

УДК 621.793: 621.785.532

А. Н. ГРИГОРЧИК, В. А. КУКАРЕКО, доктор физико-математических наук, М. А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, доктор технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМУ АЗОТИРОВАНИЮ

Исследованы структура и триботехнические свойства подвергнутых ионно-плазменному азотированию гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей ферритного (Св-08Г2С), аустенитного (06Х19Н9Т) и мартенситного (40Х13) классов. Установлено, что в результате ионного азотирования на поверхности газотермических покрытий формируются модифицированные азотом слои глубиной от 40 до 100 мкм. Микротвердость покрытия из ферритной стали возрастает в 2,3 раза, из аустенитной стали – в 2,4 раза, а из мартенситной стали – в 1,75 раза. Показано, что ионно-плазменное азотирование приводит к увеличению износостойкости при граничном трении покрытий из ферритной стали в 34 раза, из аустенитной стали – в 140 раз и из мартенситной стали – в 3,4 раза. Проведено сравнение дюрометрических и триботехнических характеристик покрытий после ионно-плазменного азотирования с характеристиками покрытий после ионно-лучевого азотирования.

Введение. Требования к функциональным свойствам узлов трения современных машин постоянно возрастают. В связи с этим возникает необходимость в повышении дюрометрических и триботехнических характеристик материалов пар трения. В частности, большинство высоконагруженных трибосопряжений работает в условиях граничного трения. Для таких узлов трения основной причиной катастрофического износа материалов является задиры и заедание, вызванные разрушением граничного слоя смазки и пластификацией контактирующих участков поверхности, что приводит к их адгезионному взаимодействию [1]. При этом пониженные прочностные свойства материалов пары трения способствуют возникновению адгезионного взаимодействия между контактирующими поверхностями. Вследствие этого проблема повышения прочностных свойств материалов, используемых для изготовления высоконагруженных пар трения, приобретает особую актуальность.

Одним из перспективных материалов для изготовления пар трения являются газотермические покрытия, обладающие высокими смазкоудерживающими свойствами. В частности, современный метод гиперзвуковой металлизации обеспечивает высокую производительность напыления и низкую пористость получаемого покрытия (~ 2–5 %) [2]. Вместе с тем невысокие прочностные характеристики гиперзвуковых газотермических покрытий не позволяют использовать их в высоконагруженных узлах трения. В частности, поверхностные слои газотермических покрытий в процессе граничного трения при высоких удельных давлениях пластифицируются, в результате чего образуются участки вырывов и выкрашивания, что приводит к катастрофическому износу покрытий. В целях повышения триботехнических свойств и противозадиристойкости гиперзвуковых газотермических покрытий целесообразно использовать методы инженерии поверхности, в частности, методы ионно-плазменного и ионно-лучевого азотирования. Указанные методы упрочнения придают поверхностным слоям высокую микротвердость и износостойкость [3]. Вместе с тем до настоящего времени отсутствуют систематизированные данные о триботехниче-

ских характеристиках в условиях граничного трения ионно-модифицированных гиперзвуковых газотермических покрытий.

В связи с этой задачей исследования являлось изучение влияния ионно-плазменного азотирования гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей разных классов на их структуру и триботехнические свойства в условиях граничного трения.

Методика проведения исследований. Исследовались гиперзвуковые газотермические покрытия из типичных проволочных сталей ферритного (Св-08Г2С), аустенитного (06Х19Н9Т) и мартенситного (40Х13) классов, нанесенные на пластины (100х50х6 мм), изготовленные из стали 45. Для получения газотермических покрытий использовалась установка АДМ-10, разработанная в ОИМ НАН Беларуси [2]. Скорость полета напыляемых частиц составляла 400–500 м/с, размер частиц – 5–40 мкм. С целью повышения прочности сцепления покрытия с основой наносился промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80.

Ионно-плазменное азотирование (ИПА) образцов покрытий проводилось на установке УА-63.950–1400/3000 в среде 25 % N₂ + 60 % Ar + 15 % H₂. Параметры ИПА: V = 470 В, I = 55 А, температура 780 К, время обработки – 5 часов.

Образцы для триботехнических и структурно-фазовых исследований (10х6х5 мм) вырезались из пластин, с напыленными слоями из проволочных сталей Св-08Г2С, 06Х19Н9Т и 40Х13. Толщина напыленных слоев составляла 0,8–1,0 мм.

Рентгеновская съемка образцов проводилась на дифрактометре «ДРОН-3» в монохроматизированном СоK_α-излучении. Запись линий осуществлялась в режиме сканирования. Шаг сканирования – 0,1°, время набора импульсов в точке – 10 сек. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ.

Триботехнические испытания образцов в режиме граничного трения проводились на машине трения МТВП по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при скорости взаимного перемещения \cong 0,2 м/с. Удельная нагрузка испытаний P со-

ставляла 50 МПа. Сравнительные испытания триботехнических свойств образцов проводились в режиме граничного трения в масляной ванне с использованием смазки И-20. Для определения величины линейного износа использовался метод искусственных баз [4].

Измерения микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор $P = 25 \text{ г}$ (0,24 Н).

Результаты исследований. В результате напыления гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей Св-08Г2С, 06Х19Н9Т и 40Х13 формируется слоистая структура, содержащая перемежающиеся прослойки металла и оксидов (рисунок 1). Содержание окислов в нанесенных покрытиях составляет $\approx 20\text{--}25 \text{ об. } \%$. Структурно-фазовые характеристики этих покрытий приведены в таблице 1.



Рисунок 1 – Микроструктура газотермического покрытия из стали 40Х13

Таблица 1 – Структурно-фазовые характеристики и микротвердость гиперзвуковых газотермических покрытий в исходном состоянии и после ионно-плазменного азотирования

Материал покрытия и режим обработки	Глубина слоя, мкм	Фазовый состав	Микротвердость, HV 0,025
Св-08Г2С	–	α , FeO, Fe ₃ O ₄	300
Св-08Г2С + ИПА	90–100	γ' , α , Fe ₃ O ₄	700
06Х19Н9Т	–	γ , α , Fe ₃ O ₄ , FeO	350
06Х19Н9Т + ИПА	40–50	γ , α , γ' , CrN, Fe ₃ O ₄	850
40Х13	–	α , γ , Fe ₃ O ₄ , FeO	600
40Х13 + ИПА	50–60	α , γ' , ϵ , CrN, Fe ₃ O ₄	1050

Фазовый состав покрытия из ферритной стали Св-08Г2С в исходном состоянии включает в себя α -Fe, FeO, Fe₃O₄. Микротвердость покрытия составляет $\sim 300 \text{ HV } 0,025$.

В результате ионно-плазменного азотирования покрытия из ферритной стали формируется упрочненный слой глубиной 90–100 мкм. В поверхностном слое покрытия, обработанного ионами азота при 780 К, содержатся следующие фазы: γ' -Fe₄N, α -Fe, Fe₃O₄. Микротвердость поверхностного слоя после такой обработки возрастает до 700 HV 0,025. Значительный прирост микротвердости покрытия обусловлен образованием в поверхностном слое нитрида γ' -Fe₄N.

В исходном состоянии газотермическое покрытие из аустенитной стали 06Х19Н9Т содержит γ - и α -фазы, а

также оксиды Fe₃O₄ и FeO. Микротвердость необработанного покрытия составляет $\approx 350 \text{ HV } 0,025$.

Ионно-плазменная обработка газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т приводит к формированию модифицированного слоя глубиной 40–50 мкм (рисунок 2, б). Фазовый состав азотированного слоя включает в себя γ , α , γ' -(Fe, Cr)₄N, CrN, Fe₃O₄. Микротвердость покрытия после ионно-плазменной обработки составляет 850 HV 0,025. Относительно высокая микротвердость поверхностного слоя покрытия достигается благодаря выделению в нем нитридов γ' -(Fe, Cr)₄N и CrN.

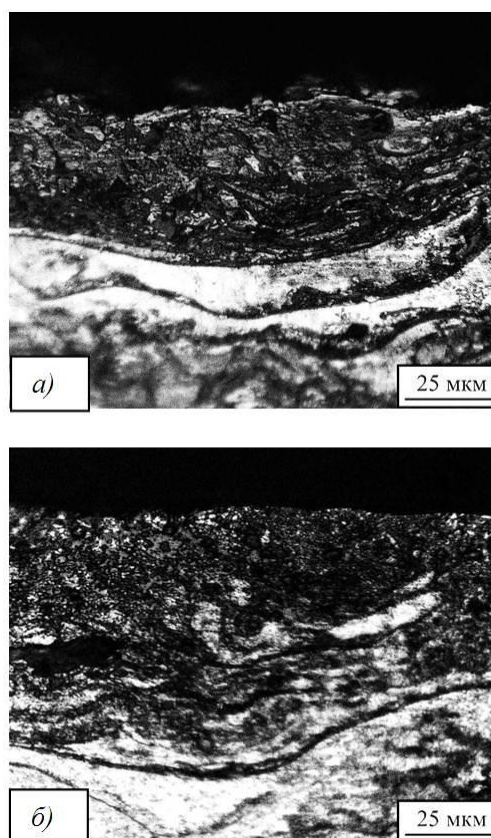


Рисунок 2 – Микроструктуры обработанных газотермических покрытий:

а – газотермическое покрытие из стали 06Х19Н9Т после ионно-плазменного азотирования при 780 К (5 часов); б – газотермическое покрытие из стали 40Х13 после ионно-плазменного азотирования при 780 К (5 часов)

Газотермическое покрытие из мартенситной стали 40Х13 в исходном состоянии имеет следующий фазовый состав: α -(Fe, Cr), γ -(Fe, Cr), Fe₃O₄, FeO. Мартенситное газотермическое покрытие характеризуется относительно высокой микротвердостью в необработанном состоянии ($\approx 600 \text{ HV } 0,025$).

В процессе ионно-плазменной обработки на поверхности покрытия из стали 40Х13 формируется модифицированный слой глубиной 50–60 мкм. Упрочненный азотированный слой включает в себя фазы α -(Fe, Cr), γ' -(Fe, Cr)₄N, ϵ -(Fe, Cr)₂₋₃N, CrN, Fe₃O₄. После ионно-плазменного азотирования микротвердость покрытия из стали 40Х13 возрастает до 1050 HV 0,025. Существенное возрастание микротвердости покрытия связано с выделением в нем в процессе обработки нитридов γ' -(Fe, Cr)₄N, ϵ -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN.

Результаты триботехнических испытаний в условиях граничного трения представлены на рисунке 3 и в таблице 2.

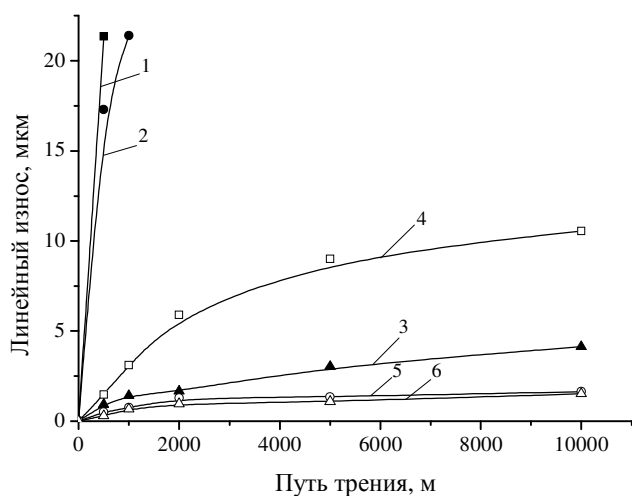


Рисунок 3 – Зависимость линейного износа от пути трения газотермических покрытий из сталей различных классов в среде смазочного материала И-20 ($P = 50$ МПа):

1 – Св-08Г2С, исходное состояние; 2 – 06Х19Н9Т, исходное состояние; 3 – 40Х13, исходное состояние; 4 – Св-08Г2С после ИПА при 780 К (5 часов); 5 – 06Х19Н9Т после ИПА при 780 К (5 часов); 6 – 40Х13 после ИПА при 780 К (5 часов)

Таблица 2 – Интенсивность линейного изнашивания газотермических покрытий в исходном состоянии и после ионно-плазменного азотирования

Материал покрытия и режим обработки	Интенсивность линейного изнашивания $I_n \cdot 10^{-9}$
Св-08Г2С	35,85
Св-08Г2С + ИПА	1,06
06Х19Н9Т	21,0
06Х19Н9Т + ИПА	0,15
40Х13	0,41
40Х13 + ИПА	0,12

Из данных, представленных на рисунке 3 и в таблице 2, можно видеть, что необработанные газотермические покрытия из ферритной и аустенитной стали обладают невысокой износостойкостью. В частности, интенсивность линейного изнашивания покрытия из стали Св-08Г2С составляет $35,85 \cdot 10^{-9}$, а интенсивность линейного изнашивания покрытия из стали 06Х19Н9Т равняется $21,00 \cdot 10^{-9}$. Покрытие из мартенситной стали 40Х13 обладает более высокой износостойкостью по сравнению с покрытиями из ферритной и аустенитной стали, и величина I_n составляет $0,41 \cdot 10^{-9}$.

После ионно-плазменного азотирования при 780 К износостойкость покрытия из ферритной стали Св-08Г2С возрастает в 34 раза по сравнению с исходным состоянием, и интенсивность линейного изнашивания составляет $1,06 \cdot 10^{-9}$. Существенное увеличение износостойкости покрытия связано с образованием в процессе обработки нитрида γ' -Fe₄N, что приводит к повышению прочностных и дюрометрических характеристик поверхностного слоя покрытия (см. таблицу 1).

Покрытие из аустенитной стали 06Х19Н9Т после ионно-плазменной обработки характеризуется еще большим приростом износостойкости по сравнению с покрытием из ферритной стали Св-08Г2С (см. таблицу 2).

В частности, интенсивность линейного изнашивания покрытия из стали 06Х19Н9Т составляет $0,15 \cdot 10^{-9}$ и уменьшается в 140 раз по сравнению с исходным состоянием (см. рисунок 3 и таблицу 2). Возрастание износостойкости и микротвердости обработанного ионами азота покрытия из стали 06Х19Н9Т обусловлено выделением в поверхностном слое нитридов γ' -(Fe, Cr)₄N и CrN (см. таблицу 1).

Для покрытия из стали 40Х13 после ИПА регистрируется самая низкая интенсивность линейного изнашивания по сравнению с покрытиями из сталей Св-08Г2С и 06Х19Н9Т. Износостойкость покрытия из мартенситной стали 40Х13 после ионно-плазменного азотирования возрастает в 3,4 раза по сравнению с необработанным состоянием (см. таблицу 2). Существенное снижение интенсивности линейного изнашивания для покрытия из мартенситной стали, а также возрастание микротвердости поверхностного слоя в процессе ионной обработки (см. таблицу 1) обусловлено выделением в покрытии большого количества легированных хромом нитридов γ' -(Fe, Cr)₄N, ϵ -(Fe, Cr)₂₋₃N, CrN и отсутствием аустенитной фазы (см. таблицу 1).

Сопоставляя полученные данные с результатами исследований влияния ионно-лучевого азотирования на дюрометрические и триботехнические характеристики аналогичных газотермических покрытий, представленных в работах [5–7], необходимо отметить, что ионно-лучевая обработка приводит к более значительному приросту микротвердости и износостойкости покрытий по сравнению с ИПА. В частности, после ионно-лучевой обработки при 750 К износостойкость покрытия из ферритной стали Св-08Г2С увеличивается в 120 раз, из аустенитной стали 06Х19Н9Т – в 360 раз, а мартенситной стали 40Х13 – в 4,4 раза. Микротвердость газотермических покрытий из сталей Св-08Г2С, 06Х19Н9Т и 40Х13 после ионно-лучевого азотирования достигает значений 1050, 1400 и 1450 HV 0,025, соответственно. Такое существенное повышение триботехнических и дюрометрических характеристик в результате ионно-лучевого азотирования связано с образованием в поверхностных слоях покрытий из сталей Св-08Г2С и 40Х13 большого количества высокопрочного ϵ -нитрида, а в покрытиях из аустенитной стали 06Х19Н9Т – твердого раствора γ'_N [5–7].

Заключение. Проведено исследование структуры, триботехнических свойств и микротвердости гиперзвуковых газотермических покрытий из проволоочных сталей ферритного (Св-08Г2С), аустенитного (06Х19Н9Т) и мартенситного (40Х13) классов, подвергнутых ионно-плазменному азотированию.

Установлено, что в результате ионно-плазменного азотирования в поверхностном слое газотермического покрытия из ферритной стали Св-08Г2С выделяется нитридная фаза γ' -Fe₄N. Микротвердость покрытия возрастает до 700 HV 0,025, что в 2,3 раза превышает микротвердость необработанного покрытия. Ионно-плазменная обработка газотермического покрытия из аустенитной стали 06Х19Н9Т приводит к формированию азотированного слоя, содержащего нитридные фазы γ' -(Fe, Cr)₄N и CrN.

Микротвердость поверхности модифицированного аустенитного покрытия увеличивается в 2,4 раза по сравнению с исходной микротвердостью и составляет 850 HV 0,025. Обработанное ионами азота покрытие из мартенситной стали 40X13 характеризуется высокой микротвердостью (1050 HV 0,025), что обусловлено образованием в азотированном слое нитридов γ' -(Fe, Cr)₄N, ϵ -(Fe, Cr)₂₋₃N и CrN.

Установлено, что ионно-плазменное азотирование приводит к существенному возрастанию износостойкости газотермических покрытий. В частности, износостойкость газотермического покрытия из стали Св-08Г2С увеличивается в 34 раза, аустенитного – в 140 раз, а мартенситного – в 3,4 раза по сравнению с исходным состоянием покрытий.

Проведено сопоставление дюрOMETрических и триботехнических характеристик газотермических покрытий из сталей ферритного, аустенитного и мартенситного классов после ионно-плазменного азотирования с аналогичными характеристиками покрытий после ионно-лучевой обработки. Показано, что ионно-лучевое азотирование приводит к более значительному возрастанию микротвердости и износостойкости газотермических покрытий всех классов по сравнению с ионно-плазменным азотированием.

Получено 28.05.2016

A. N. Grigorchik, V. A. Kukareko, M. A. Belotserkovskiy. Wear resistance of hypersonic thermal coatings of steel of different classes exposed ion-plasma nitriding.

Studies structure and tribological properties subjected to ion-plasma nitriding hypersonic thermal coatings of ferrite steel (Св-08Г2С) austenitic (06X19Н9Т) and martensitic (40X13) classes. It is found that as a result of ion nitriding thermal coatings on the surface modified nitrogen layers are formed deep from 40 to 100 microns. The microhardness of the coating of ferritic steel is increased by 2.3 times, from austenitic steel is 2.4 times, and martensitic steel is 1.75 times. It is shown that plasma ion nitriding leads to increased wear resistance in the boundary friction coatings ferritic steel 34 times, made of austenitic steel and 140 times of the martensitic steel 3.4 times. A comparison durometrical and tribological characteristics of coatings after ion-plasma nitriding of the characteristics of coating after ion-beam nitriding.

Список литературы

- 1 Дроздов, Ю. Н. Трение и износ в экстремальных условиях / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
- 2 Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. – Минск : Белорус. наука, 1998. – 583 с.
- 3 Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А. В. Белый [и др.]. – Минск : Белорус. наука, 2007. – 244 с.
- 4 Григорчик, А. Н. Структура и триботехнические характеристики модифицированного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13 / А. Н. Григорчик, А. В. Белый // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Вып. 2. – Минск : ОИМ НАНБ, 2013. – С. 479–481.
- 5 Структурно-фазовое состояние и износостойкость в условиях граничного трения обработанных ионами азота газотермических покрытий из сталей различных классов / В. А. Кукареко [и др.] // Трение и износ. – 2015. – № 6. – С. 661–670.
- 6 Структура и триботехнические характеристики газотермического покрытия из проволоочной стали 06X19Н9Т, обработанного ионами азота / А. Н. Григорчик [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 2. – С. 61–64.
- 7 Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства обработанного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13 / А. Н. Григорчик [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 2. – С. 26–30.