

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новожилов, В.В. Основы нелинейной теории упругости / В.В. Новожилов: Едиториал УРСС, 2003. - Москва - 214 с.: ил. — ISBN 5-354-00302-4.
2. Лихачев, Ю. И. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пупко. - М.: АТОМИЗДАТ, 1975. - 280 с.
3. Куликов, И. С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / Под ред. В. Б. Нестеренко. - Минск: Наука и техника, 1984. - 103с.
4. Куликов, И. С. Прочность элементов конструкций при облучении / И.С. Куликов, В.Б. Нестеренко, Б.Е. Тверковкин. - Минск: Навука і тэхніка, 1990. - 143с.
5. Ширвель, П.И. Прочность неравномерно нагретых цилиндрических тел в условиях ползучести и радиационного облучения / П.И. Ширвель, А.В. Чигарев, И.С. Куликов. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2014. – 252 с.: ил. — ISBN 978-985-550-661-5.

УДК 621.785.5

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ТЕРМОДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ ОСАЖДЕНИЕМ ТВЕРДЫХ ПЛЕНОК TiAlN

Константинов В.М., Ковальчук А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Технологии получения термодиффузионных слоев на сталях и сплавах железа достигли значительного прогресса и позволяют проводить насыщение практически любыми элементами, а толщины получаемых диффузионных слоев охватывают не менее четырех порядков значений [1]. Традиционно применяемые методы химико-термической обработки (ХТО) являются эффективными, но зачастую малопродуктивными процессами поверхностного упрочнения. Большая длительность технологического цикла определяется относительно низкой диффузионной подвижностью атомов насыщающего элемента, особенно при низкотемпературных процессах (азотирование, карбонитрация). Вместе с этим уровень прочностных свойств диффузионных слоев в условиях повышающихся требований к эффективности поверхностного упрочнения, заключающейся в уровне получаемых свойств и ресурсоемкости применяемых технологий, а также тяжелые условия работы упрочняемых деталей, зачастую является недостаточным.

Однако потенциал практического использования диффузионных слоев не реализован полностью. Так, перспективным представляется совершенствование методов ХТО с привнесением операций вакуумной ионно-плазменной обработки для получения на поверхности твердых пленок, которые могут формировать с диффузионным слоем двухслойную систему, обладающую свойствами, не достижимыми в отдельности диффузионным слоем и твердой пленкой [2].

В данной работе были получены опытные образцы износостойких двухслойных систем типа «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN». Они представляли собой структуру модифицированной в результате карбонитрации, ИПА, однофазного и двухфазного борирования в порошковой среде стальной

подложки и высокотвердого тонкого покрытия TiAlN на поверхности, полученного путем контролируемого магнетронного нанесения.

Карбонитрацию проводили при 550...600 °С, 7 ч в порошковой среде в контейнере, герметизируемом плавким затвором в камерной электропечи. ИПА осуществляли на установке AP 63, производства ФТИ НАН Беларуси. Установленные режимы ионно-плазменного азотирования: длительность – 6 ч; напряжение разряда – 800 В; плотность тока – 21 мА/см²; состав смеси газов – Н₂ + N₂; давление смеси – 600 МПа; температура – 520...540 °С; мощность разряда – до 80 кВт. Для проведения процесса диффузионного борирования использовали оригинальную порошковую смесь с высокой насыщающей способностью «besto-bor» [34]. Насыщение проводили при 950 °С, 1 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч в контейнерах, герметизируемых плавким затвором.

Покрyтия TiAlN наносили в НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ под руководством зав. лаборатории элионики чл. корр. НАН Беларуси, д. ф.-м. наук, профессора Ф.Ф. Комарова. Для формирования покрытий была использована вакуумная установка магнетронного распыления УРМ 327. В процессе нанесения образцы нагревались до T=250°С. Толщина покрытий TiAlN на всех образцах составила 1 мкм.

Результаты оценки интегральной микротвердости пленок TiAlN на неупрочненных подложках и двухслойных систем «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN» при различных нагрузках на индентор (таблица 1) показали, что микротвердость двухслойных систем существенно выше, а увеличение микротвердости с уменьшением прикладываемой нагрузки больше, чем для покрытий TiAlN на неупрочненных подложках.

Это указывает на то, что покрытие TiAlN не продавливается, а с учетом своей толщины приносит значительный вклад в результирующие свойства поверхности с диффузионным слоем. Это подтверждается значениями микротвердости при нагрузках 0,49 Н и 0,98 Н, которые не характерны для использованных материалов подложек и полученных на них слоев в результате ХТО.

Установлено, что износостойкость двухслойных систем «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN» выше, чем покрытий TiAlN на неупрочненных подложках. Так, по сравнению с покрытиями TiAlN на неупрочненных подложках микротвердость и износостойкость двухслойных покрытий, получаемых в результате предварительной карбонитрации и последующего нанесения TiAlN выше в 3,4...3,5 и 2,0...2,2 раза; предварительного ИПА – 3,3...4,1 и 1,8...2,1 раза; предварительного однофазного борирования – 9,4...11,5 и 2,6...2,9 раза; предварительного двухфазного борирования – 11,5...13,2 и 3,3...3,4 раза соответственно [3].

Это можно объяснить тем, что предварительное упрочнение в результате карбонитрации, ИПА или борирования увеличивает время до появления остаточной деформации в подложке и снижает градиент жесткости и твердости между подложкой и покрытием. Образующиеся в результате термодиффузионно-

го насыщения остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое подложки увеличивают время до появления усталостных трещин.

Таблица 1 – Свойства образцов после различных видов упрочнения

Материал подложки + вид обработки	Микротвердость (МПа) при нагрузке (Н)			Сравнительная износостойкость, отн. ед.
	0,49	0,196	0,098	
Армко-железо	1750	1950	2110	1,0
Армко-железо + карбонитрация	3940	5240	7390	2,0
Армко-железо + однофазное борирование	12800	15300	18860	2,9
Армко-железо + двухфазное борирование	15300	18540	24330	3,3
38Х2МЮА	2120	2390	2810	1,3
38Х2МЮА + ИПА	8740	8900	9350	2,4
Х12М	3610	4070	4400	1,4
Х12М + ИПА	12820	13900	14260	2,8
У8А	1920	2380	2710	1,4
У8А + однофазное борирование	15620	19860	25600	3,7
У8А + двухфазное борирование	18900	24930	34060	4,6
9ХС	1920	2300	2680	1,4
9ХС + однофазное борирование	15480	20430	26750	4,1
9ХС + двухфазное борирование	17550	25750	35400	4,8
12Х18Н10Т	1870	2120	2440	1,1
12Х18Н10Т + карбонитрация	5650	6460	8470	2,2

В результате карбонитрации формируются остаточные напряжения сжатия величиной около 400...800 МПа, ИПА – 600...800 МПа, борирования – 800...1000 МПа [4]. В то же время, при наступлении начала последовательного разрушения покрытия более жесткий термодиффузионный слой накапливает меньше остаточной деформации и тормозит развития очага разрушения, а при полном разрушении покрытия под контртелом работает дольше неупрочненной подложки.

Полученные экспериментальные результаты и анализ известных подходов к материаловедению композитов позволяют полагать, что получаемые в результате ХТО и последующего вакуумного нанесения двухслойные системы «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN» представляют собой новые микрокомпозиционные материалы, так как в этой системе выполняются все современные условия, по которым происходит их определение, а именно:

- рассматриваемая система состоит из двух разнородных по составу, структуре и свойствам материалов, имеющих границу раздела;
- термодиффузионный слой и вакуумное покрытие образуют оригинальную систему своим объемным сочетанием;
- обсуждаемые двухслойные покрытия характеризуются свойствами, не достижимыми в отдельности материалами вакуумного покрытия и термодиффузионно упрочненной стальной подложки.

Экспериментально показано, что упрочнение сталей подложки в результате карбонитрации, борирования или карбидизации в порошковой среде также позволяет повысить эффективность пленок TiAlN, заключающуюся в существенном повышении их несущей способности, повышении микроиндентационного отклика, а также износостойкости поверхности с пленкой TiAlN.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Константинов, В. М. Инновационные технологии поверхностной обработки стальных изделий / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, Г. В. Стасевич, А. В. Ковальчук, В. Г. Щербаков, Д. В. Гегеня // "Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК" : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 9 июня 2016 г. / М-во с. х. и прод. Респ. Беларусь, РО «Белагросервис», УО «Белорус. гос. аграр. техн. ун-т»; редкол.: Н.К. Лисай [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2016. – С. 177–180.
2. Komarov, F.F. The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings / F.F Komarov, V.M. Konstantinov, A.V. Kovalchuk, S.V. Konstantinov, H.A. Tkachenko // Wear. – 2016. – Vol. 352-353. – P. 92–101.
3. Константинов, В.М. Свойства двухслойных износостойких покрытий «термодиффузионный слой – TiAlN» на сталях / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук, В.Г. Дашкевич // Журнал физики и инженерии поверхности, 2016. – Т. 1 – № 2. – С. 213-224.
4. Лахтин Ю.М. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДИФфуЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ И СОДЕРЖАНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Керамические покрытия на основе оксида алюминия в зависимости от условий протекания процесса могут состоять из различных фаз, имеющих значительные отличия в физико-механических свойствах: метастабильной фазы γ -Al₂O₃, высоко-температурной фазы α -Al₂O₃, нескольких промежуточных фаз β , δ , θ [1, 2]. Условия протекания фазовых переходов низкотемпературной модификации (γ -Al₂O₃) в высокотемпературную (α -Al₂O₃) с учетом наличия всех промежуточных состояний и итоговое количественное соотношение фаз в полученных покрытиях непостоянны и в различных литературных источниках носят противоречивый характер. Однако, установлено, что решающее влияние на процесс перехода одной фазы в другую оказывает технология напыления, технологические параметры процесса, а также особенности строения и свойств порошка и его поведения в плазменной струе.

Поэтому изменить фазовый состав и управлять полиморфными превращениями в плазменных керамических покрытиях на основе оксида алюминия можно не только за счет изменения условий напыления, но и путем оптимизации исходного состава порошка, используемого при получении покрытия. Кроме того, введение дополнительных элементов позволяет не только изменить фа-