

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ТОПОКОМПОЗИТА ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ «СТАЛЬ – PVD ПОКРЫТИЕ»

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Разработана методика создания слоистого композита из конструкционной стали и PVD покрытия с триботехническими свойствами, опосредованными сочетанием материала основы и покрытия, методами их получения и обработки, а также долей в формировании свойств поверхностного слоя. В свою очередь значения этих свойств можно обозначить как начальную, контрольную точку при создании аналогичных композитов и дальнейшем прогнозировании их свойств.

The technique of creating a layered composite structural steel and PVD coating tribological properties mediated by a combination of substrate and coating material, methods for their preparation and processing, as well as share in shaping the properties of the surface layer. In turn, the values of these properties can be designated as primary, the reference point in creating similar composites and predicting the future of their properties.

Современные требования к уровню эксплуатационной стойкости деталей пар трения с одновременной минимизацией их массогабаритных параметров и уходе от объемной обработки для прецизионных деталей определили направление развития инженерии поверхности, которое предполагает создание поверхностных композиций с заданным уровнем свойств при использовании традиционных методов поверхностной обработки, а также вакуумных ионно-плазменных технологий.

В этой связи получило развитие новое направление – топокомпозиционное материаловедение [1], основанное на создании новых конструктивных материалов – топокомпозитивов, и позволяющее выделить и объединить лучшие свойства разнородных материалов в единую поверхностную композицию. Термин «топокомпозиит» изначально определялся как «поверхностно слоистый композиционный материал, представляющий из себя такой поверхностный слой, состоящий из материала основы и материала покрытия, внешние воздействия в котором воспринимаются и локализуются не только в материале покрытия, но и в материале основы. По сути, такой материал обладает свойствами, недостижимыми материалом покрытия и материалом основы в отдельности» [2]. Сейчас под топокомпозиитом часто понимается лю-

бая многослойная поверхностная композиция, свойства слоев которой находятся во взаимной зависимости. В области топокомпозиционного материаловедения существует ряд проблем, обусловленных практически полным отсутствием справочных достоверных данных о значениях физико-механических характеристик материала покрытия в тонкопленочном состоянии и в виде тонкого покрытия, жестко связанного с материалом основы, отсутствии стандартизованных технических средств и методик определения физических и механических свойств материалов покрытий топокомпозитивов, отсутствии методики создания и расчетов рациональной конструкции топокомпозитивов из различных групп материалов и других.

Традиционно исследования вопросов получения по такому принципу композиционных материалов носят односторонний характер. Основное внимание уделяется свойствам наиболее исследуемых на сегодня низкофрикционных покрытий: от простых монофазных до нанокомпозитных с трехмерной структурой, при этом объектом исследований в вопросах эксплуатационной надежности упрочняемых изделий, как правило, служат свойства самого покрытия. Однако следует отметить существенное влияние свойств основы на свойства покрытий и, главным образом, на общие характеристики слоистого композита [3–8]. Так как известно, что при формировании тонких твердых пленок на металлической поверхности посредством нанесения в среде реактивных газов существует резкая граница в значениях твердости между покрытием и основой. Если поверхность, на которую наносят покрытие, пластична и не обладает достаточной жесткостью, то, несмотря на высокую твердость, покрытие при повышенных удельных нагрузках в процессе трения прогибается и разрушается под влиянием контактной нагрузки при взаимодействии с контртелом. При этом разрушение может происходить из-за эффекта снижения несущей способности слоистой системы, то есть при нагрузках меньше необходимых для появления пластической деформации в материале основы.

В это делает актуальным формирование общих подходов к созданию топокомпозитивов на основе стали и PVD покрытий в виде алгоритма с гарантированно заложенными свойствами и минимальной стоимостью для рассматриваемых слоистых систем. Такая схема предложена в данной работе, причем минимальная стоимость обеспечивается применением наиболее дешевых материалов основы и покрытия среди аналогичных слоистых систем, а также снижением толщины покрытия до уровня тонкой пленки, а гарантированный уровень свойств – технологией обработки основы при известных режимах.

В ходе работы предложена научная гипотеза о том, что в рассматриваемых слоистых композициях наличие переходного слоя с постепенно нарастающей твердостью между основой и твердым покрытием должно устранить образование резкой границы в значениях твердости, тем самым демпфируя градиент жесткости разнородных материалов и позволяя повысить свойства

непосредственно покрытия и слоистой системы в целом. Данная гипотеза подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований [9, 10], которые показывают, что наличие упрочненного подслоя позволяет не только устранить продавливание покрытия, но и получить для рабочей поверхности комплекс свойств, которые не характерны для материалов композита в отдельности, а эффект общего упрочнения основного материала модифицированием основы и нанесением покрытия не аддитивен.

Начальной точкой при прогнозировании поведения покрытий на углеродистых сталях предложено использовать результаты испытаний слоистых композитов на основе армко-железа после различных режимов цементации. Такие результаты должны хорошо согласовываться, так как при насыщении углеродом поверхности армко-железа, последнюю, можно рассматривать как углеродистую сталь. Ввиду ряда объективных преимуществ, предлагается совместное насыщение поверхности углеродом и азотом в результате низкотемпературной нитроцементации или карбонитрации. Таким образом, в качестве материала основы предлагается использование технического железа, упрочняемого в результате низкотемпературной нитроцементации или карбонитрации с получением только диффузионной зоны. Не модифицированная сердцевина в этом случае обеспечивает постоянный градиент твердости по глубине основы. А протяженность такого переходного слоя в сочетании с тонким покрытием обеспечивает уменьшение погрешности из-за масштабного фактора. При этом свойства такого поверхностного слоя будут хорошо коррелировать со свойствами азотированного слоя на углеродистой стали.

Низкотемпературная нитроцементация проводилась в порошковой среде, в контейнере, герметизируемом плавким затвором в печи СШЗ-6.6/7. Применение низкотемпературной нитроцементации для обработки деталей обеспечивает повышение усталостной прочности на 50–80 %, резкое повышение сопротивления изнашиванию по сравнению с цементацией и азотированием. Получаемые на поверхности нитридные и карбидные фазы даже при отсутствии смазочного материала не проявляют склонности к схватыванию и последующему катастрофическому изнашиванию. Для последующего нанесения твердого покрытия она обеспечивает появление протяженного переходного слоя с постепенно нарастающей твердостью между материалом изделия и твердым покрытием.

В качестве материала для нанесения покрытия выбран нитрид титана из-за его высокой технологичности, широкой распространенности, относительно низкой стоимости и высокого уровня триботехнических характеристик. Нанесение покрытий осуществлялось на автоматизированной установке магнетронного напыления Caroline D12A1 в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ под руководством член-корр. НАН Беларуси Ф.Ф. Комарова.

Проведенный аналитический обзор существующих технологий показал, что покрытие TiN для повышения твердости, износостойкости и прочностных характеристик на армко-железе, как правило, не применяется, за ис-

ключением случаев декоративных покрытий, когда материал основы не существенен в преследуемых целях. Известны отдельные случаи получения тонкого покрытия TiN на армко-железе для исследования свойств собственно покрытий и сравнения свойств с другими решениями, в основном, встречаются всевозможные промежуточные слои, как для повышения адгезии, так и несущие, и однослойные сложнолегированные толщиной 5–10 мкм и многослойные с различной схемой легирования слоев.

Для задания минимального значения свойств группы твердых PVD покрытий на основе из армко-железа или углеродистой стали предлагается однослойное покрытие стехиометрического нитрида титана толщиной 1 мкм. Нанесение покрытия TiN и группы легированных покрытий на его основе как способ повышения износостойкости изделий, применяется по большей части для режущего и штампового инструмента и отдельных деталей пар трения. Материалы основы при этом, как правило, быстрорежущие, коррозионно-стойкие хромоникелевые и хромистые стали, твердые сплавы, легированные инструментальные стали. Минимальная толщина покрытия TiN составляет от 0,5 мкм, при том, что под ним слой титана 0,5–2 мкм, легированного одним или несколькими металлами из группы рутений, родий, палладий. Минимальная толщина моноподкрытия TiN 3 мкм в комплексе с термической обработкой. Моноподкрытия TiN толщиной 1 мкм при рассмотрении трибомеханических свойств обычно используются в качестве образцов сравнения и для определения сил адгезии.

Таким образом, сочетание рассмотренных материалов, методов их получения и обработки (рис. 1), а также их доли в формировании свойств поверхностного слоя позволяют обозначить получаемый из них слоистый композит как базовый (рис. 2), а его триботехнические свойства (табл. 1) как начальную, контрольную точку при создании аналогичных композитов и дальнейшем прогнозировании их свойств.

При этом часть поверхности в предложенной системе «основа – покрытие» по сути, представляет собой новый композиционный материал, так как в этой системе выполняются все современные условия, по которым происходит определение композиционных материалов [11], а именно:

- система состоит из двух разнородных материалов, имеющих границу раздела;
- металлическая основа и покрытие образуют систему своим объемным сочетанием.
- такая система обладает свойствами, которые недостижимы в отдельности ни для материала покрытия, ни для материала основы.

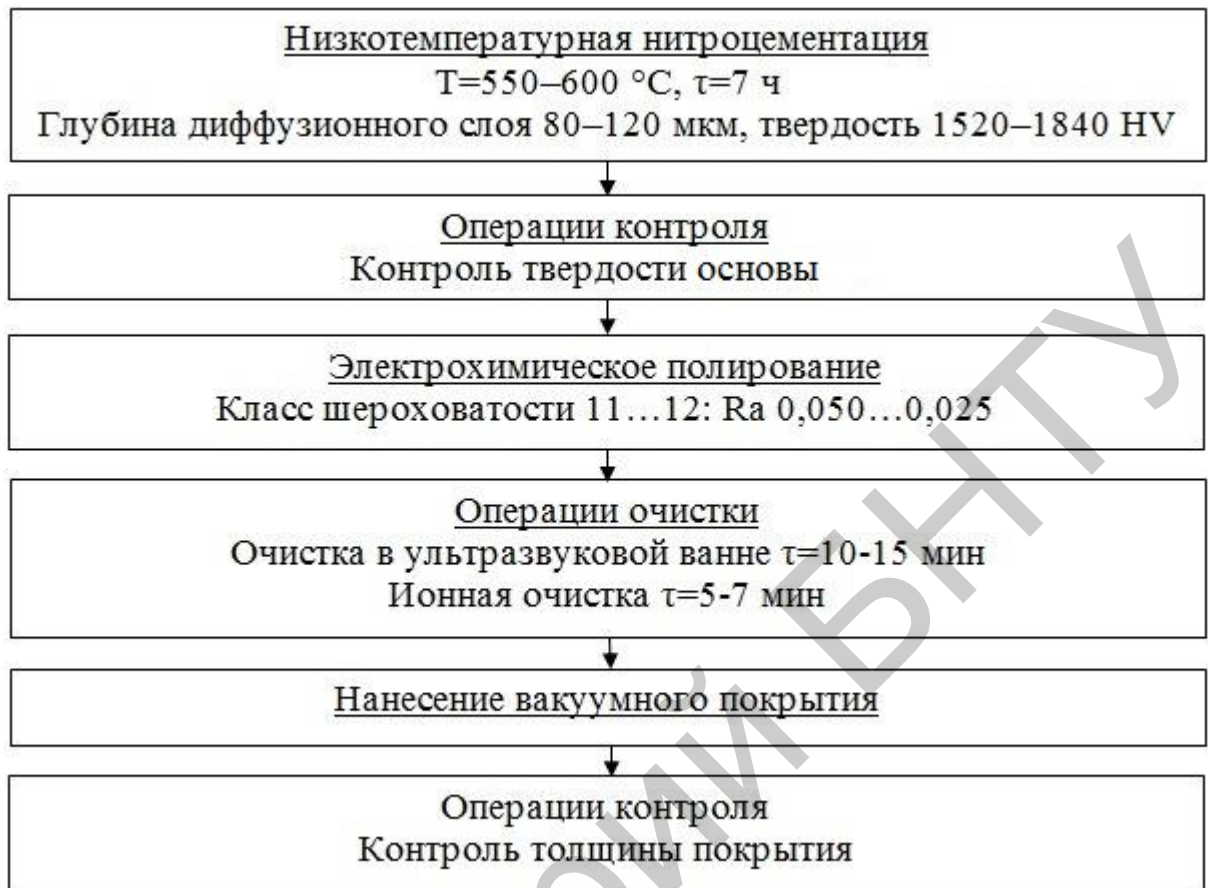


Рис. 1. Лабораторная технология получения топокомпозита из углеродистой стали и нитрида титана, время технологического цикла – 9,5 ч

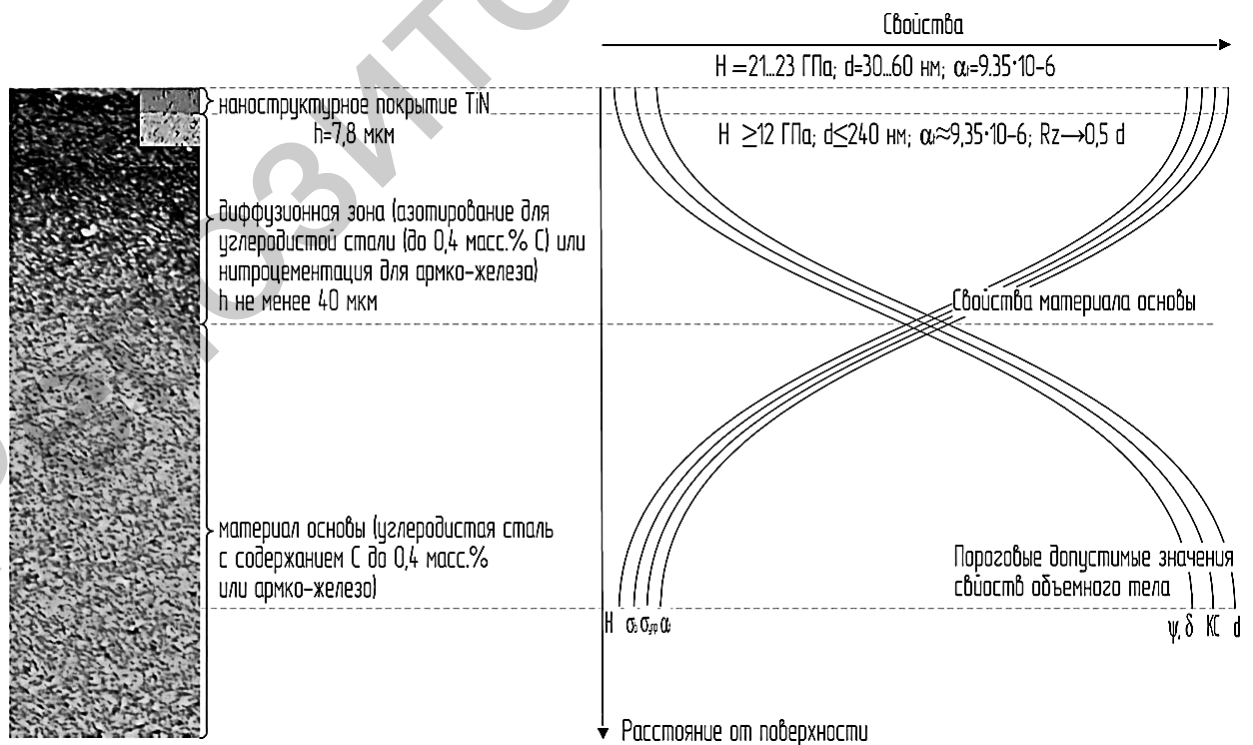


Рис. 2. Схема создания топокомпозита «сталь – PVD покрытие»

Табл. 1.

Результаты трибологических испытаний

Образец	Поверхность			
	а)	б)	в)	г)
	без обработки	после химико-термической обработки	с покрытием TiN	после химико-термической обработки с покрытием TiN
Линейный износ $S_{\text{изм}}$, мкм	1073,3	1010,7	698,2	520,5
Объёмный износ, $\text{мкм}^3 \cdot 10^3$	1718,0	1435,0	474,2	194,9

Значения микротвердости образцов получали при измерении твердости по методу восстановленного отпечатка при нагрузке на индентор 0,09–0,98 Н на автоматическом твердомере DuraScan 20. Значения нанотвердости, модулей упругости и жесткости получали при обработке кривых нагружения-разгрузки, полученных на приборе Nanoindenter G200 (MES Systems, USA) по методике Оливера-Фарра, с применением трехгранного алмазного индентора Берковича с радиусом закругления при вершине 20 нм при вдавливании наноиндентора на глубину до 200–300 нм. Трещиностойкость оценивали при измерении суммарной длины трещин на покрытиях при нагрузке на индентор 1–5 Н, силу адгезионного взаимодействия между покрытием и основой оценивали качественно по наличию отслоения покрытия при испытании на вытяжку сферической лунки по Эриксену. Трибологические испытания проводили по схеме сухого трения скольжения «диск–плоскость» на модернизированной коллективом лаборатории элионики НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ машине трения М22-М (ПВ), износостойкость определяли по величине линейного износа за 1 ч при нормальной нагрузке 0,1 Н. Исследования структуры топокомполитов осуществляли с использованием микроскопа Альтами МЕТ 3М и дифрактометра ДРОН-3.

Установленные значения микротвердости, нанотвердости, износостойкости, трещиностойкости покрытия, а также уровень адгезионного взаимодействия между покрытием и основой в предлагаемой модели слоистой композиции позволяет сделать вывод о том, что известные недостатки PVD/CVD покрытий и существующих технологий получения слоистых композитов из стали и наноструктурированного нитрида титана, ограничивающие их эффективность и сдерживающие их широкое практическое использование, могут быть полностью или в значительной степени устранены при определенном сочетании составляющих материалов, подготовки основы и обработки полученной слоистой системы [10]. При этом значения микротвердости и нанотвердости предлагаемой слоистой системы превышают аналогичные по сравнению с композитами, имеющими в качестве основы низколегированную конструкционную сталь или нитраллой. Так, микротвердость рабочей поверхности топокомполита – на уровне 9–10 ГПа, нанотвердость – на уровне

28–30 ГПа, модуль упругости – 750–770 ГПа, жесткость – 2,3–2,5 Н/м. Сила адгезионного взаимодействия между покрытием и основой на образцах обеспечивает полное прилегание покрытия при испытаниях на вытяжку сферической лунки по Эриксену. Величина линейного износа образцов топокомпози- тов системы на основе армко-железа после низкотемпературной нитроцемен- тации меньше величины износа покрытий нитрида титана на стали 12Х18Н10Т и составляют соответственно 520 и 660 мкм [8]. Коэффициент трения покрытий 0,35.

Данные результаты объясняются появлением в образцах, упрочненных предложенным способом, протяженного переходного слоя с постепенно нарастающей твердостью между материалом основы и покрытием, демпфи- рующим градиент их жесткости и предотвращающим продавливание покры- тия, а также формированием переходного диффузионного слоя между осно- вой и покрытием и, как следствие, диффузионному зацеплению покрытия на металлической основе.

Предполагаемые области эффективного практического использования: детали гидросистем автомобилей, детали топливной аппаратуры, подшипни- ки, в том числе ленточные, шарнирные, системы «вал-втулка-подшипник», штоки амортизаторов, газовых пружин и упоров, компрессорная техника, де- тали ткацких станков, механизмы парораспределения турбины, движущиеся детали штампов, детали общего машиностроения.

Список использованных источников

1. Воронин, Н.А. Актуальные проблемы создания топокомпози- тов триботехнического назначения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, – Т.13 – №4(3) – 2011. – С. 695–698.

2. Воронин, Н.А. Топокомпози- ты – новый класс конструкционных ма- териалов триботехнического назначения. Ч.1 // Трение и износ, 1999. – Т.20 – №3 – С. 533–544.

3. Гринберг, П.Г. Метод получения наноструктурированных топоком- позитов для повышения несущей способности конструктивных элементов энергооборудования / П.Г. Гринберг, В.Н. Горюнов, К.Н. Полещенко, Е.Е. Та- расов // Вестник Омского ун-та – 2012. – №2. – С. 253–258.

4. Семенов А.П., Воронин Н.А. Вакуумные ионно-плазменные техноло- гии упрочнения деталей машин триботехнического назначения. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин. Под ред. А.П. Гусенкова, М.: Наука, 1992. – С. 174–402.

5. Воронин, Н.А. Абразивная стойкость и несущая способность ваку- умных ионно-плазменных покрытий. // Трение и износ, – 1998, – Т.19 – №5. – С. 616–622.

6. Константинов, В.М. Влияние модифицирования подложки на свой- ства топокомпози- та / В.М. Константинов, Ф.Ф. Комаров, В.В. Пилько, Г.А. Ткаченко, А.В. Ковальчук // "Актуальные проблемы прочности", между-

народная научная конференция (53; 2012; Витебск). – 53 Международная научная конференция "Актуальные проблемы прочности", 2–5 октября 2012 года, Витебск, Беларусь : сборник материалов : в 2 ч. – Витебск : ВГТУ.– Ч.1. – С. 155–158.

7. Константинов, В.М. Оценка повышения износостойкости от упрочнения основы систем "конструкционная сталь – нитрид титана" / А.В. Ковальчук, В.М. Константинов // "Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сборник докладов Международного симпозиума (Минск, 10–12 апреля, 2013 г.) : в 2 ч. / гл. ред. П.А. Витязь. – Минск: Беларуская навука. – Ч. 2. – С. 106–109.

8. Константинов, В.М. Оценка износостойкости покрытия TiN на упрочненной и не упрочненной стальной основе / В.М. Константинов, Ф.Ф. Комаров, А.В. Ковальчук, В.В. Пилько // Вестник БарГУ. Серия: Физико-математические науки. Технические науки научно-практический журнал. – 2013. – С. 102 – 107.

9. Воронин, Н.А. Особенности и прикладной аспект механики контактного взаимодействия жесткого сферического штампа с упруго-пластичным слоистым полупространством // Межвуз. сб. науч. тр. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин. Тверь: ТГТУ, 2006. – С. 32–55.

10. Константинов В.М., Ковальчук А.В., Ткаченко Г.А. Повышение жесткости металлической основы систем «конструкционная сталь – нитрид титана» Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет. – Вып. 36 Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. в 2 ч. БНТУ. – Минск, 2012.– Ч.1 – С. 152–161.

11. Хоккинг М., Вассантари В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 518 с.