

В. М. Константинов¹, Ф. Ф. Комаров², А. В. Ковальчук¹, В. В. Пилько²

¹Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», г. Минск

²Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко», г. Минск

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЯ TiN НА УПРОЧНЁННОЙ И НЕУПРОЧНЁННОЙ СТАЛЬНОЙ ОСНОВЕ

Представлены результаты исследования влияния упрочняющей химико-термической обработки металлической основы топокомполитов «конструкционная сталь — нитрид титана» на трибологические свойства рабочей поверхности. В процессе работы выполнены трибологические испытания полученных слоистых систем и проведён расчёт скорости изнашивания покрытия TiN на различных подложках. Установлен эффект повышения свойств покрытия TiN от предварительной упрочняющей химико-термической обработки стальной основы.

Введение. При формировании тонких плёнок нитридов переходных металлов на металлической поверхности посредством магнетронного напыления в среде реактивных газов существует резкая граница в значениях твёрдости между покрытием и материалом основы. Если поверхность, на которую наносят покрытие, пластична и обладает достаточной жёсткостью, то, несмотря на высокую твёрдость, 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 так называемого эффекта снижения несущей способности слоистой системы, т. е. при нагрузках меньших, чем необходимые для появления пластической деформации в материале основы [1]. Наличие переходного слоя с постепенно нарастающей твёрдостью между материалом основы и твёрдым покрытием позволяет устранить образование резкой границы в значениях твёрдости, тем самым демпфируя градиент жёсткости разнородных материалов и позволяя повысить свойства непосредственно покрытия в связи с получением упрочнённого подслоя и слоистой системы в целом [2]. Оценка степени упрочнения материала основы проводят, как правило, при определении твёрдости и износостойкости объёмного материала [3]. Так, если оценка трибологических свойств слоистой системы проводится с использованием традиционных способов изучения свойств объёмных материалов, то оценка изменения свойств непосредственно покрытия представляет определённые трудности: 1) необходимость применения специализированного

оборудования, большая трудоёмкость и значительные затраты времени; 2) использование сложного математического аппарата. Однако с некоторыми допущениями эта оценка становится возможной и при известных результатах трибологических испытаний объёмных материалов.

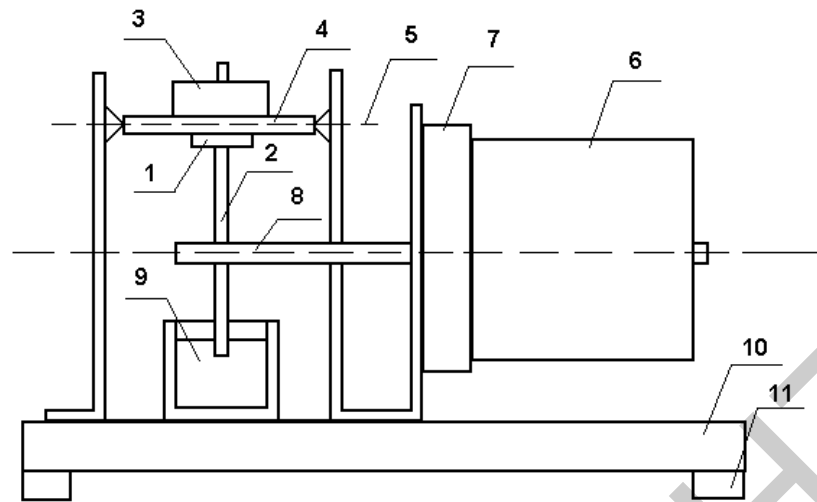
Методология и методы исследования. Оценка износостойкости покрытия TiN на различных основах проводилась путём сопоставления износостойкости топокомпозиата «конструкционная сталь — нитрид титана» и износостойкости отдельно взятого соответствующего материала основы (конструкционная сталь), подвергнутых трибологическим испытаниям в одинаковых условиях.

В качестве упрочняющей обработки основы была выбрана упрочняющая химико-термическая обработка, включающая низкотемпературную нитроцементацию в интервале температур 550...600°C в течение 6 ч, которая проводилась в порошковой среде в контейнере, герметизируемом плавким затвором. В качестве насыщающей среды использовалась порошковая смесь: железосинеродистый калий 60% $K_4Fe(CN)_6$ + древесный уголь 30% С + активатор процесса химической реакции 10% $BaCO_3$. Предварительная термическая обработка образцов отсутствовала.

После низкотемпературной нитроцементации толщина слоя на армо-железе составила 80 мкм, твёрдость повысилась с 1 250 до 1 520 HV, на нержавеющей стали толщина слоя — 120 мкм, твёрдость повысилась с 1 520 до 1 840 HV. Толщину слоя определяли измерением микротвёрдости от поверхности до сердцевины образца с шагом в 30...40 мкм. Резкое падение твёрдости принималось за границу между слоем и основным материалом.

Нанесение покрытия нитрида титана осуществлялось путём магнетронного распыления нитрида титана TiN на поверхность образцов. Толщина покрытия на всех образцах составила 1 микрон.

В ходе исследований был использован метод изучения износостойкости при трении в паре «диск — плоскость», разработанный в НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ как замена методу определения износостойкости на машине трения М22-М (ПВ) Института проблем материаловедения АН УССР, имеющей низкую точность. Схема установки и её внешний вид представлены на рисунке 1.



1 — образец, 2 — диск, 3 — нагрузка, 4 — консоль, 5 — ось качания,
6 — двигатель, 7 — редуктор, 8 — ось вращения, 9 — лубрикант, 10 — станина,
11 — виброопоры

a)



b)

Рисунок 1 — Схема (a) и внешний вид (b) установки

Установка смонтирована на станине, снабжённой виброопорами. Контртело в виде диска из нержавеющей стали 12Х18Н9Т приводится во вращение со скоростью 0,33 об/с синхронным двигателем типа РД-09 через редуктор. Образец, предварительно сбалансированный с помощью подвижного противовеса, прижимается к диску усилием калиброванного разновеса, размещённого точно над осью вращения.

Основные параметры и условия испытаний: диаметр контртела 60 мм, скорость вращения $0,33 \pm 0,006$ об/с, нормальная нагрузка — 10 г, время испытания $t_{\text{исп}}$ — 90 мин.

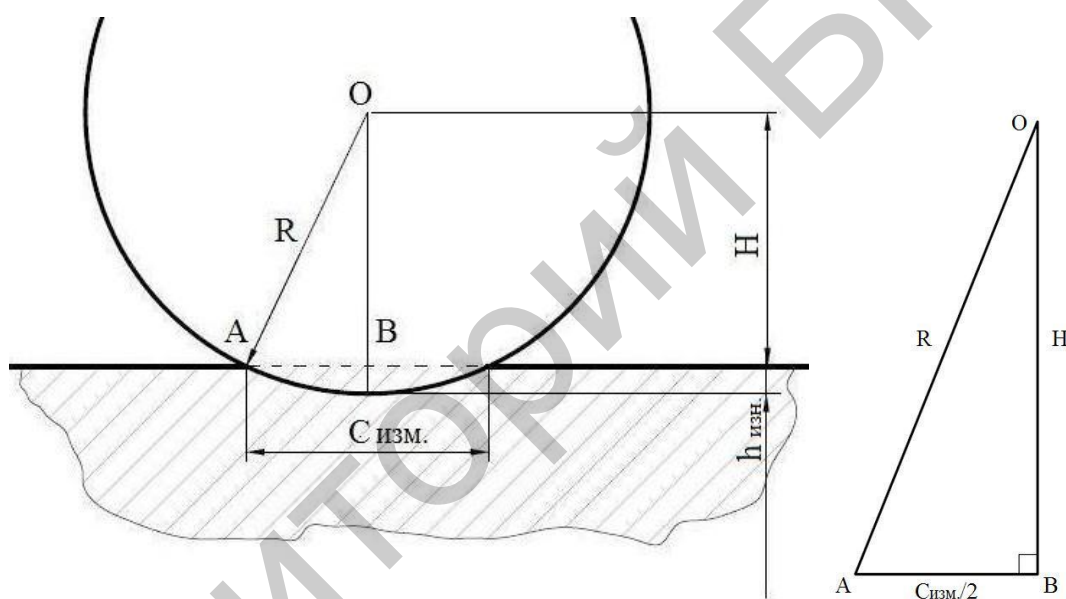
Измерения следов трения проводились на микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ ЗМТ.

Принятые допущения:

– скорость изнашивания покрытия и основы постоянны в течение всего времени испытания;

– глубина упрочненного подслоя много больше толщины покрытия TiN и глубины лунки износа.

Геометрическая схема испытаний представлена на рисунке 2.

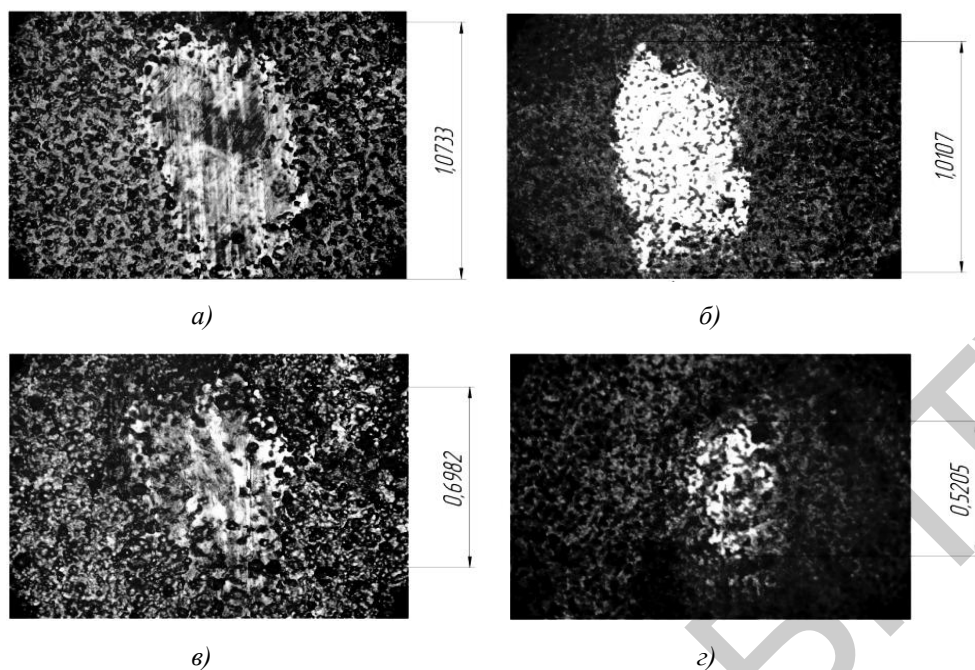


R — радиус диска, 30000 мкм; $h_{\text{изн}}$ — глубина лунки износа, $h_{\text{изн}} = R - H$, где $H = \sqrt{R^2 - (C_{\text{изм}}/2)^2}^{0,5}$;
 $C_{\text{изм}}$ — величина линейного износа, равная $2 AB$

Рисунок 2 — Геометрическая схема испытаний

Результаты исследования и их обсуждение. Поведённые эксперименты и расчёты позволяют сделать следующие обоснования:

1. *Материал основы — армко-железо.* Фотографии поверхностей образцов армко-железа после испытаний приведены на рисунке 3, полученные результаты — в таблице 1.



а — без упрочняющей обработки, 1 250 HV; б — после упрочняющей обработки, 1 520 HV;
 в — без упрочняющей обработки с покрытием TiN; з — после упрочняющей обработки с покрытием TiN

Рисунок 3 — Поверхности образцов армко-железа после трибологических испытаний, $\times 100$

Т а б л и ц а 1 — Результаты испытаний образцов армко-железа

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

Результаты расчетов для образцов армко-железа:

а) глубина лунки износа $h_{\text{изн}} = 4,80$ мкм, скорость изнашивания, определяемая по формуле $v_{\text{изн}} = h_{\text{изн}} / t_{\text{исп}}$, составляет 0,0533 мкм / мин;

б) глубина лунки износа $h_{\text{изн}} = 4,26$ мкм, скорость изнашивания $v_{\text{изн}}$ составляет 0,0473 мкм / мин;

в) глубина лунки износа $h_{\text{изн}} = 2,03$ мкм, скорость изнашивания TiN на основе без упрочняющей обработки $x_{1\text{изн TiN}} = 0,0142$ мкм / мин. При этом $t_{\text{исп}}$ определяется как

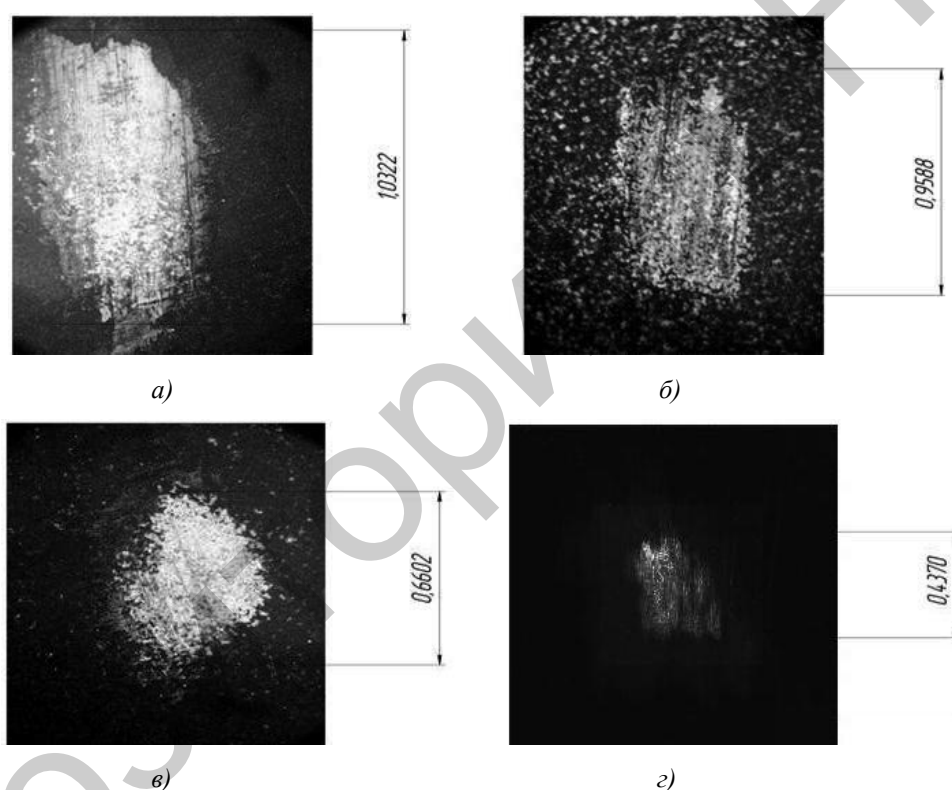
$$t_{\text{исп}} = t_{\text{изн.осн}} + t_{\text{изн.TiN}} = \frac{h_{\text{изн}} - h_{\text{TiN}}}{v_{\text{изн.осн}}} + \left(\frac{h_{\text{TiN}}}{x_{\text{изн.TiN}}} \right);$$

г) глубина лунки износа $h_{\text{изн}} = 1,13$ мкм, скорость изнашивания TiN на основе после упрочняющей обработки $x_{2\text{изн TiN}}$ составляет 0,0115 мкм / мин.

Отношение скорости изнашивания покрытия TiN на упрочнённой основе к скорости его изнашивания на не упрочнённой основе представлено выражением $x_{1\text{изн TiN}} / x_{2\text{изн TiN}} = 1,2348$.

Из расчёта следует, что износостойкость покрытия TiN на упрочнённой основе из армко-железа выше на 23,5%. Увеличение твёрдости основы на 21,6% повышает износостойкость покрытия на 23,5%.

2. *Материал основы сталь 12X18H10T.* Фотографии поверхностей образцов стали 12X18H10T после испытаний приведены на рисунке 4, результаты испытаний образцов на основе стали 12X18H10T представлены в таблице 2.



a — без упрочняющей обработки, 1 520 HV; *б* — после упрочняющей обработки, 1 840 HV;
в — без упрочняющей обработки с покрытием TiN; *з* — после упрочняющей обработки с покрытием TiN

Рисунок 4 — Поверхности образцов стали 12X18H10T после трибологических испытаний, $\times 120$

Т а б л и ц а 2 — Результаты испытаний образцов стали 12X18H10T

Образец	Поверхность			
	а)	б)	в)	г)
	без обработки	после химико-термической обработки	с покрытием TiN	после химико-термической обработки с покрытием TiN
Линейный износ $C_{\text{изм}}$, мкм	1032,2	958,8	660,2	437,0
Объёмный износ, $\text{мкм}^3, \times 10^3$	1528,0	1228,1	296,1	117,4

Результаты расчетов для образцов стали 12X18H10T:

- а) глубина лунки износа $h_{\text{изн}} = 4,44$ мкм, скорость изнашивания, определяемая по формуле $v_{\text{изн}} = h_{\text{изн}} / t_{\text{исп}}$, составляет 0,0493 мкм / мин;
- б) глубина лунки износа $h_{\text{изн}} = 3,83$ мкм, скорость изнашивания $v_{\text{изн}}$ составляет 0,0426 мкм / мин;
- в) глубина лунки износа $h_{\text{изн}} = 1,82$ мкм, скорость изнашивания TiN на основе без упрочняющей обработки $x_{1\text{изн TiN}} = 0,0136$ мкм / мин;
- г) глубина лунки износа $h_{\text{изн}} = 0,80$ мкм, скорость изнашивания TiN на основе после упрочняющей обработки $x_{2\text{изн TiN}}$ составляет 0,0089 мкм / мин.

Отношение скорости изнашивания покрытия TiN на упрочнённой основе к скорости его изнашивания на неупрочнённой основе определяется выражением $x_{1\text{изн TiN}} / x_{2\text{изн TiN}} = 1,5281$.

Из расчёта следует, что износостойкость покрытия TiN на упрочнённой основе из стали 12X18H10T выше на 52,8%. Увеличение твёрдости основы на 21,1% повышает износостойкость покрытия на 52,8%.

Заключение. Установлено неаддитивное влияние упрочнения металлической основы химико-термической обработкой и нанесением износостойкого покрытия на свойства объемного материала и непосредственно покрытия.

Показано, что эффект повышения износостойкости покрытия TiN от предварительной упрочняющей химико-термической обработки основы для топокомпозитов на основе стали 12X18H10T выше, а повышение износостойкости топокомпозитов и непосредственно покрытий не пропорционально изменению твердости основы и больше для основы из стали 12X18H10T.

Повышение износостойкости от комплексной обработки по величине объемного износа составило более 8,8 и 13,0 раза соответственно для армко-железа и стали 12X18H10T, в то время как в отдельности химико-термическая обработка и нанесение покрытия дают соответственно повышение износостойкости в 1,2 и 3,6 раза для армко-железа и 1,3 и 5,2 раза соответственно.

Рассчитанная скорость изнашивания покрытия TiN на различных основах показала, что наличие упрочненного подслоя повышает износостойкость непосредственно покрытия на 23,5 и 52,8 % для основы из армко-железа и стали 12X18H10T соответственно. Так увеличение твердости основы из армко-железа на 21,6 % приводит к повышению износостойкости (уменьшению скорости изнашивания) покрытия на ней на 23,5 %, а увеличение твердости основы из стали 12X18H10T на 21,1 % приводит к повышению износостойкости покрытия на ней на 52,8 %.

Список цитируемых источников

1. *Воронин, Н. А.* Топокомпози́ты — новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Ч. 1 Трение и износ — 1999. — Т.20. — №3. — С. 313–320. Ч.2. Трение и износ — 1999. — Т.20. — №5. — С.533–544.

2. Исследование структуры, элементного состава и свойств нанокристаллических покрытий на основе легированного примесями нитрида титана / Ф. Ф. Комаров [и др.] // Белорусский промышленный форум-2012, 15—18 мая 2012. — Минск: Инфопарк, — 2012. — С. 22—26.

3. Современная трибология: Итоги и перспективы / под ред. К. В. Фролова. — М.: ЛКИ, 2008. — 480 с.

The influence of strengthening thermo-chemical treatment on tribological properties of metal substrate made of topocomposite (construction steel-TiN) was investigated in this work. Tribological tests were carried out after thermo-chemical treatments, as well as wear rate analysis of TiN layers were held out. A significant strength increase was observed for the topocomposite structures after additional thermo-chemical treatment.