

УДК 621.793.1 + 621.785.5, 620.178.162

В. М. Константинов¹, А. В. Ковальчук¹, Ф. Ф. Комаров², В. В. Пилько²¹Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», Минск²Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, 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]. Оценку 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 тематического 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 топокомполита «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: 60% железосинеродистого калия $K_4Fe(CN)_6$ + 30% древесного угля С +

+ 10% активатора процесса химической реакции BaCO_3 . Предварительная термическая обработка образцов отсутствовала.

После низкотемпературной нитроцементации толщина слоя на армко-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 мкм.

В ходе исследований был использован метод изучения износостойкости при трении в паре «диск — плоскость», разработанный в научно-исследовательском учреждении «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ как замена метода определения износостойкости на машине трения

M22-M (ПВ) Института проблем материаловедения АН УССР, имеющей низкую точность.

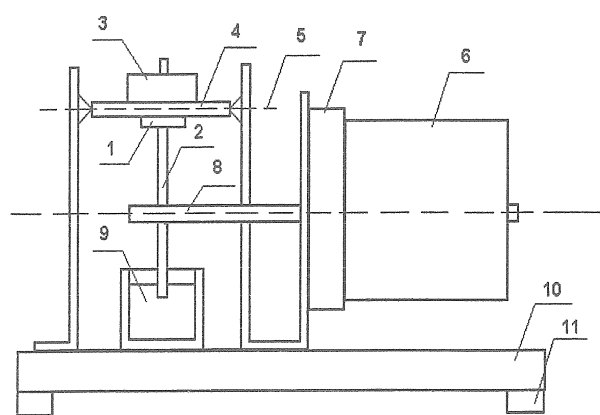
Установка (рисунок 1) смонтирована на станине, снабжённой виброопорами. Контртело в виде диска из нержавеющей стали 12X18H9T приводится во вращение со скоростью 0,33 об/с синхронным двигателем типа РД-09 через редуктор. Образец, предварительно сбалансированный с помощью подвижного противовеса, прижимается 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 — 90 мин.

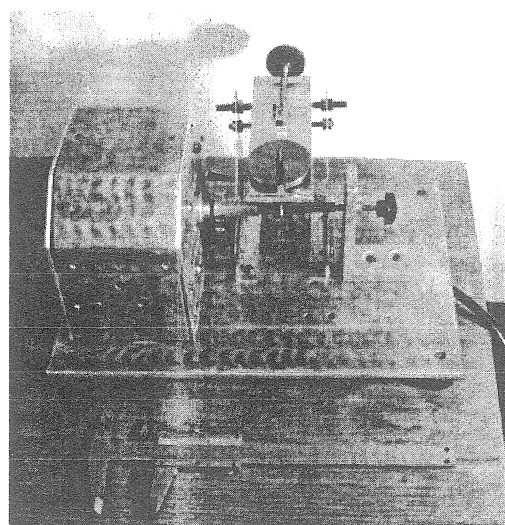
Измерения следов трения проводились на микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ ЗМТ по схеме (рисунок 2).

Принятые допущения:

- скорость изнашивания покрытия и основы постоянны в течение всего времени испытания;
- глубина упрочнённого подслоя много больше толщины покрытия TiN и глубины лунки износа.



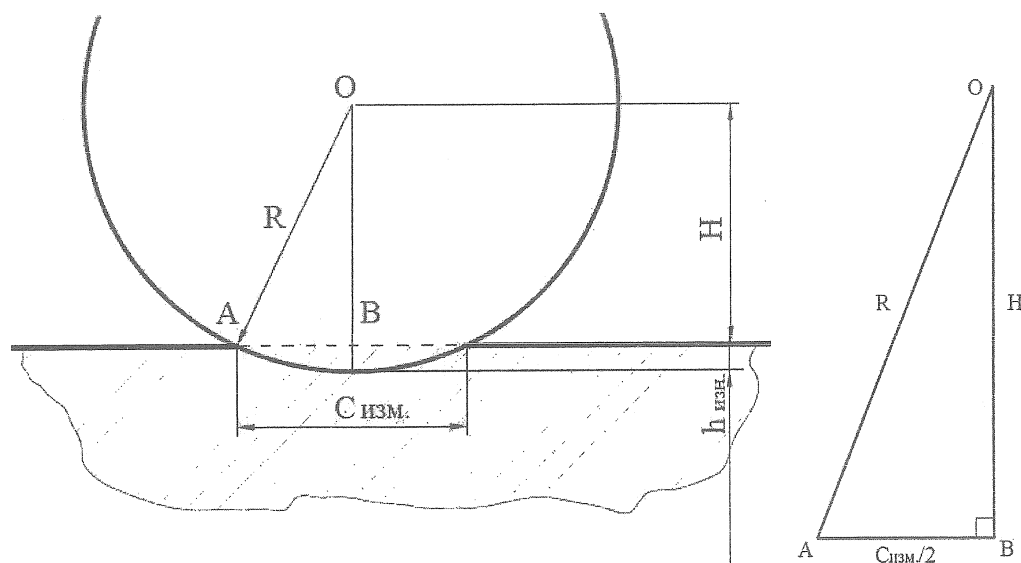
а)



б)

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

Рисунок 1 — Схема (а) и внешний вид (б) установки



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

Рисунок 2 — Геометрическая схема испытаний

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты проведённых экспериментов и расчётов позволяют сделать следующие выводы:

1. *Материал основы — армко-железо* (рисунок 3). Результаты расчётов для образцов армко-железа (таблица 1):

1) столбец 2: глубина лунки износа $h_{\text{изн}}$ равна 4,80 мкм, скорость изнашивания, определяемая по формуле $v_{\text{изн}} = h_{\text{изн}} / t_{\text{исп}}$, составляет 0,0533 мкм / мин;

2) столбец 3: глубина лунки износа $h_{\text{изн}}$ — 4,26 мкм, скорость изнашивания $v_{\text{изн}}$ — 0,0473 мкм / мин;

3) столбец 4: 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

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

4) столбец 5: глубина лунки износа $h_{\text{изн}}$ — 1,13 мкм, скорость изнашивания TiN на основе после упрочняющей обработки $x_{2\text{изн TiN}}$ — 0,0115 мкм / мин.

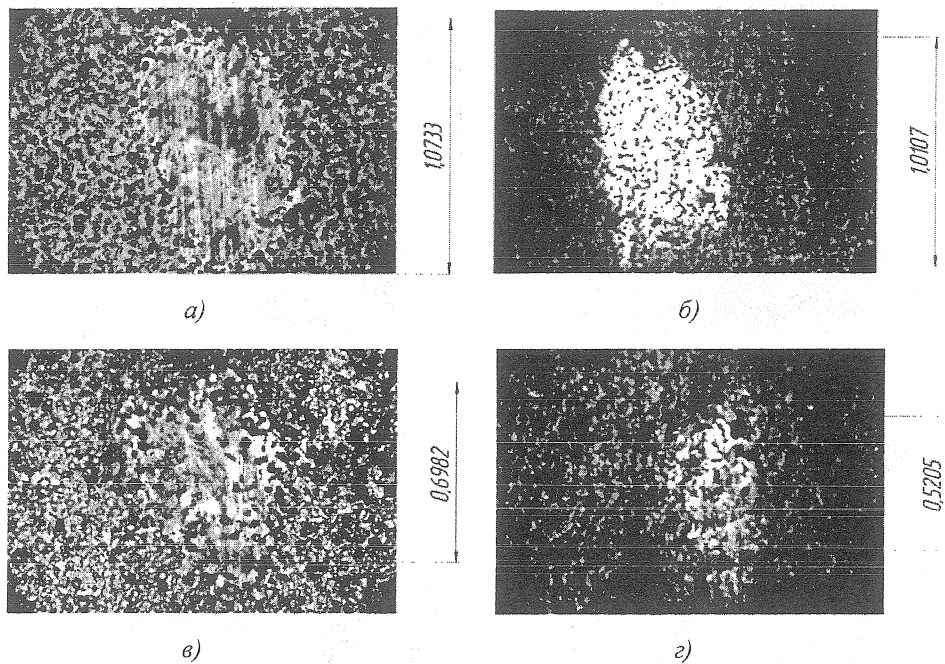
Отношение скорости изнашивания покрытия TiN на упрочнённой основе к скорости его изнашивания на неупрочнённой основе представлено выражением $x_{1\text{изн TiN}} / x_{2\text{изн TiN}} = 1,2348$.

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* (рисунок 4). Результаты расчётов для образцов стали 12X18H10T (таблица 2):

1) столбец 2: глубина лунки износа $h_{\text{изн}}$ равна 4,44 мкм, скорость изнашивания, определяемая по формуле $v_{\text{изн}} = h_{\text{изн}} / t_{\text{исп}}$, составляет 0,0493 мкм / мин;

2) столбец 3: глубина лунки износа $h_{\text{изн}}$ — 3,83 мкм, скорость изнашивания $v_{\text{изн}}$ — 0,0426 мкм / мин;



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			
	без обработки	после химико-термической обработки	с покрытием TiN	после химико-термической обработки с покрытием TiN
1	2	3	4	5
Линейный износ $C_{изм}$, мкм	1 073,3	1 010,7	698,2	520,5
Объёмный износ, $мкм^3 \cdot \times 10^3$	1 718,0	1 435,0	474,2	194,9

3) столбец 4: глубина лунки износа $h_{изн}$ — 1,82 мкм, скорость изнашивания TiN на основе без упрочняющей обработки $x_{1изн TiN}$ — 0,0136 мкм / мин;

4) столбец 5: глубина лунки износа $h_{изн}$ — 0,80 мкм, скорость изнашивания TiN на основе после упрочняющей обработки $x_{2изн TiN}$ — 0,0089 мкм / мин.

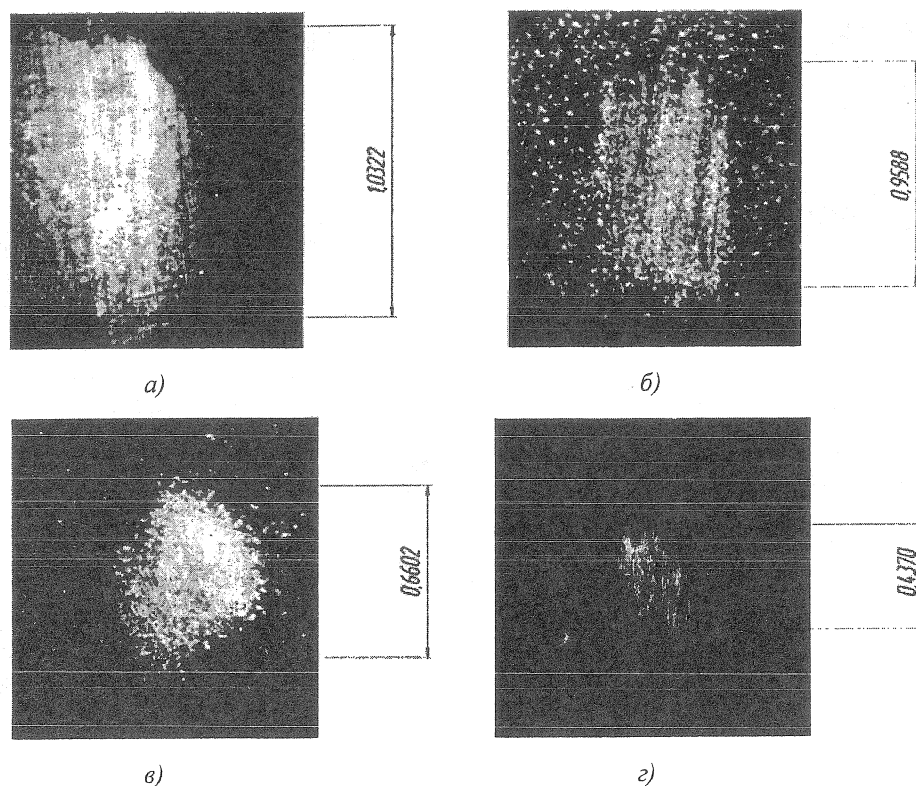
Отношение скорости изнашивания покрытия TiN на упрочнённой основе к скорости его изнашивания на неупрочнённой основе определяется выражением $x_{1изн TiN} / x_{2изн TiN} = 1,5281$.

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 объёмного материала и непосредственно покрытия.

Показано, что эффект повышения износостойкости покрытия TiN от предварительной упрочняющей химико-термической обработки основы для топокомполитов на



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			
	без обработки	после химико-термической обработки	с покрытием TiN	после химико-термической обработки с покрытием TiN
1	2	3	4	5
Линейный износ $S_{\text{лвм}}$ мкм	1 032,2	958,8	660,2	437,0
Объёмный износ, $\text{мкм}^3 \cdot 10^3$	1 528,0	1 228,1	296,1	117,4

основе стали 12X18H10T выше, а повыше-ние износостойкости топокомпози-тов и непосредственно покрытий не пропорцио-нально изменению твёрдости основы и боль-ше для основы из стали 12X18H10T.

Повышение износостойкости от комплек-сной обработки по величине объёмного износа составило более 8,8 и 13,0 раз для армко-железа и стали 12X18H10T соответ-ственно, в то время как в отдельности химико-термическая обработка и нанесение покры-тия дают повышение износостойкости в 1,2

и 3,6 раза для армко-железа и 1,3 и 5,2 раза для стали 12X18H10T соответственно.

Рассчитанная скорость изнашивания по-крытия TiN на различных основах показала, что наличие упрочнённого подслоя повыша-ет износостойкость непосредственно покры-тия на 23,5 и 52,8% для основы из армко-же-леза и стали 12X18H10T соответственно. Так, увеличение твёрдости основы из армко-же-леза на 21,6% приводит к повышению изно-состойкости (уменьшению скорости изнаши-вания) покрытия на ней на 23,5%, а увеличе-

ние твёрдости основы из стали 12Х18Н10Т на 21,1% приводит к повышению износостойкости покрытия на ней на 52,8%.

Список цитируемых источников

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

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

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

Материал поступил в редакцию 22.01.2013 г.

The influence of strengthening the 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 the wear rate analyses of TiN layers were held out. A significant strength increase was fixed for the topocomposite structures after additional thermo-chemical treatment.