

УДК 621

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПАРЫ ТРЕНИЯ

© Ю.П.Тарасенко, В.А.Сорокин, Л.А.Кривина

*Нижегородский филиал Учреждения Российской Академии Наук
Института машиноведения им.А.А. Благонравова РАН, ЗАО НПП «Трибоника»
Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Штатные детали пары трения изготавливают: игла – из стали марки У10 ($d=1,5$ мм), подпятник – из лейкосапфира. Рабочая часть игл проходит закалку на мартенсит. Скорость вращения иглы в подпятнике составляет ~ 108000 об/мин.

Необходимость модернизации указанной пары трения вызвана недостаточной ее работоспособностью, связанной с повышенным износом рабочей части иглы и склонностью материала подпятников к хрупкому разрушению.

С целью повышения надежности и ресурса высокоскоростного узла «игла-подпятник» проведено комплексное исследование структуры и триботехнических свойств деталей пары трения как в штатном исполнении, так и после модифицирования поверхности контакта игл с помощью ионной имплантации (ИИ) C^+ , а также после нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия нитрида титана. Проведены сравнительные исследования подпятников из лейкосапфира и нитрида бора.

Ключевые слова: микротвердость, износостойкость, металлография, ионно-лучевая обработка.

Методика исследования

Микротвердость материала экспериментальных игл и покрытий TiN измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

Износостойкость рабочих поверхностей игл исследовали при работе в контакте с подпятниками из лейкосапфира и нитрида бора на имитирующем приборе при осевой нагрузке на иглу $P=6,75$ Н, скорости вращения $n=3500$ об/мин при сухом трении и в условиях смазки ВМ-1. Объем вынесенного металла рассчитывали по изменению глубины отпечатка индентора, предварительно нанесенного на иглу в зоне контакта, на приборе ПМТ-3. Критерии износа рассчитаны по методикам, предложенным в работе [2].

Металлографические исследования микроструктуры материала игл, покрытия TiN, а также измерение толщины покрытия и геометрических параметров пятен износа при испытании на износостойкость проводили на микроскопе «Неофот-32».

Ионно-лучевую обработку рабочих поверхностей игл проводили на ускорителе ИЛУ-3 при энергии ионов C^+ $E=40$ кэВ и плотности тока $j=10$ мкА/см² с набором доз (1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,2)·10¹⁷ см⁻², а также на частотно-импульсном ускорителе «Радуга» при энергии ионов C^+ $E=80$ кэВ и плотности тока $j=12-16$ мкА/см² с набором доз (1,2; 1,3; 1,4; 1,5)·10¹⁷ см⁻².

Покрытие TiN на рабочие поверхности игл напыляли на установке ВУ2-МБС при давлении азота в вакуумной камере $P_{N_2}=0,04$ Па по режимам, соответствующим матрице планирования ПФЭ 2² (таблица 1), а также по режиму: $I_d=120$ А, $U_{см}=140$ В. Очистку и активацию поверхностей под нанесение покрытия TiN осуществляли методом ионной бомбардировки в циклическом режиме (5 секунд обработки + 5 секунд паузы и т.д. до полного окончания процесса). Время нанесения металлического подслоя $\alpha-Ti$ составляло $\tau_{нс}=3$ минуты, а время нанесения покрытия- $\tau_{нп}=30$ минут.

Таблица 1 – Условия проведения опытов по нанесению покрытия TiN на иглы

Факторы	Ток дуги I_d , А	Опорное напряжение $U_{см}$, В
Основной уровень	140	140
Интервал варьирования	20	20
Верхний уровень	160	160
Нижний уровень	20	20

Рентгеноструктурный анализ TiN-покрытия проводили на дифрактометре «Дрон-2» с применением Fe-K α -излучения методом «скользящего пучка».

Результаты исследования

В результате ионно-лучевой обработки ИИ С⁺ с различным набором доз облучения рабочие поверхности игл практически не меняют свои геометрические параметры, в том числе и шероховатость (рис.1). На рис. 2 показана микроструктура рабочих поверхностей после травления: в исходном состоянии и после обработки с набором дозы $D=1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

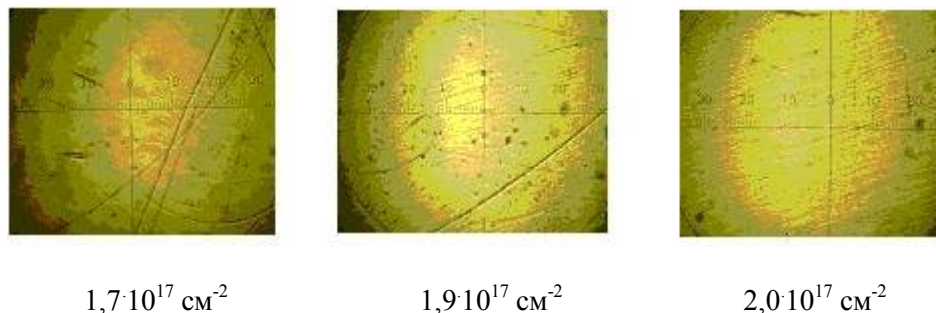


Рис. 1 – Микроструктура нетравленных поверхностей трения опытных игл после ионно-лучевой обработки с разными дозами облучения (x250).

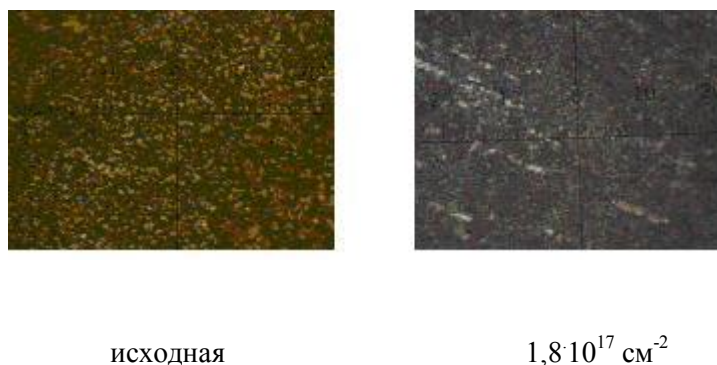


Рис. 2 – Микроструктура металла рабочих поверхностей игл в закаленном состоянии и в закаленном состоянии с последующей ИЛЮ (x750).

Микроструктура металла поверхностей трения игл в приведенных случаях идентичная: мелкодисперсная, мартенситная. В связи с высокой дисперсностью зерна игольчатая структура мартенсита не выявляется.

После ионной имплантации C^+ рабочих поверхностей игл, как правило, наблюдается повышение микротвердости (max на 20 %) (таблица 2).

Результаты испытаний износостойкости рабочих поверхностей игл (таблица 3) после облучения неоднозначны и не определяют корреляционную зависимость между степенью износа и микротвердостью материала игл в зоне контакта.

Таблица 2 – Микротвердость опытных игл в зоне трения и вершине торца до и после ионной имплантации на установке ИЛУ-3.

Исходная микротвердость игл H_{50} , кгс/мм ²		Доза облучения, см ⁻²	Микротвердость игл после обработки H_{50} , кгс/мм ²	
торец \varnothing 0,8 мм	рабочая поверхность R 1,3		торец \varnothing 0,8 мм	рабочая поверхность R 1,3
945	890	$1,7 \cdot 10^{17}$	1170	1140
1050	890	$1,8 \cdot 10^{17}$	1310	1210
1170	890	$1,9 \cdot 10^{17}$	1230	1180
975	1030	$2,0 \cdot 10^{17}$	920	940
990	790	$2,2 \cdot 10^{17}$	1150	820

Таблица 3 – Результаты испытаний износостойкости поверхностей трения игл после ИИ C^+ при вращении в подпятнике из лейкосапфира в условиях сухого трения

Доза ИЛО, см ⁻²	Время испытания, мин.	Толщина слоя потерян­ного металла, $\times 10^{-3}$ мм	Объем потерян­ного материала, $\times 10^{-3}$ мм	Линейная интенсивность изнашивания I, $\times 10^{-7}$	Удельный объем износа W, $\times 10^{-7}$ мм ² /кгс
$1,7 \cdot 10^{17}$	1	1,749	1,55	1,41	1,82
$1,8 \cdot 10^{17}$	1	0,77	0,889	0,63	1,06
$1,9 \cdot 10^{17}$	1	0,657	0,686	0,52	0,79
$2,0 \cdot 10^{17}$	1	1,8	1,430	1,50	1,72
$2,2 \cdot 10^{17}$	1	0,8	0,586	0,61	0,66

Ионная имплантация игл ионами C^+ на установке «Радуга» для всех проведенных режимов не дала ожидаемого результата – повышения микротвердости, а, наоборот, понизила уровень H_u приповерхностного слоя материала ~ на 100-200 кгс/мм² (таблица 4).

Таблица 4 – Микротвердость в зоне трения и вершине торца игл до и после ионной имплантации C^+ на установке «Радуга»

Исходная микротвердость игл H_{50} , кгс/мм ²		Доза облучения, см ⁻²	Микротвердость игл после обработки H_{50} , кгс/мм ²	
торец	рабочая поверхность		торец	рабочая поверхность
1090	1005	$1,2 \cdot 10^{17}$	840	1005

1020	920	$1,3 \cdot 10^{17}$	750	840
1140	1180	$1,4 \cdot 10^{17}$	720	750
890	770	$1,5 \cdot 10^{17}$	660	680

На рис. 3 показаны некоторые микрофотографии поверхностей игл после нанесения на них вакуумных ионно-плазменных (ВИП) покрытий нитрида титана. В результате напыления ВИП-покрытий шероховатость поверхностей ухудшается ~ на один класс. Покрытие имеет зеренную микроструктуру с размером зерна 2-8 мкм. На поверхности и в объеме ВИП-покрытия наблюдаются микродефекты в виде капельной фазы α -Ti, электроэрозии, инородных включений неопределенного состава.

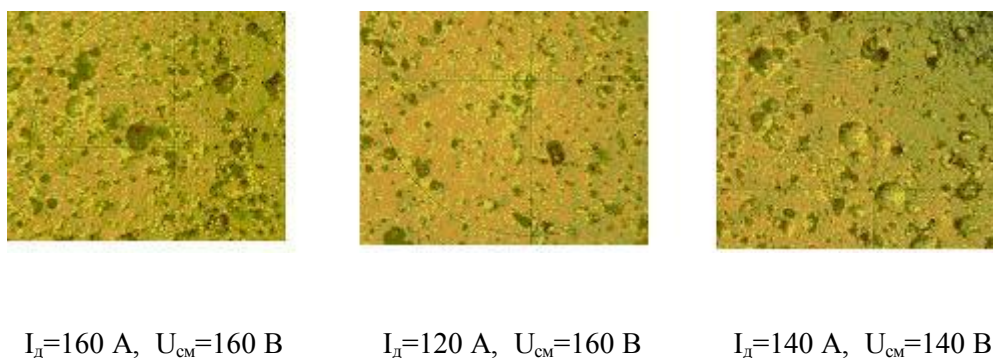


Рис. 3 – Микроструктура ВИП-покрытий нитрида титана на поверхностях игл (x500).

Содержание капельной фазы α -Ti и следов электроэрозии в TiN-покрытии зависит от изменения факторов варьирования – тока дуги и напряжения смещения, при этом влияние тока дуги выражается 1,5 раза сильнее.

Из результатов, приведенных в таблице 5, следует, что среднестатистическое значение микротвердости TiN-покрытия, нанесенного на рабочие поверхности игл, превышает средний уровень микротвердости материала данных игл в рабочей зоне в исходном состоянии в ~1,5-2 раза.

Таблица 4 – Микротвердость в зоне трения и вершине торца исходной иглы и после нанесения покрытия TiN.

Исходная микротвердость игл H_{50} , кгс/мм ²		Режим нанесения TiN-покрытия	Микротвердость TiN-покрытия H_{50} , кгс/мм ²		Толщина покрытия, мкм
торец	рабочая поверхность		торец	рабочая поверхность	
920	890	$I_d=160$ А, $U_{cm}=160$ В		1680	8
1240	860	$I_d=160$ А, $U_{cm}=120$ В		1780	6
1050	890	$I_d=120$ А, $U_{cm}=160$ В		1590	7
1140	1070	$I_d=120$ А, $U_{cm}=120$ В		1550	6
1300	750	$I_d=140$ А, $U_{cm}=140$ В		1680	8
1180	1120	$I_d=120$ А, $U_{cm}=140$ В	1620	1680	--
1070	1140	$I_d=120$ А, $U_{cm}=140$ В	1520	1650	--

Рентгеновское исследование покрытия TiN показало, что изменение режимов напыления не оказывает существенного влияния на его структурно-фазовое состояние. Основным соединением является кубическая фаза TiN. Размер блоков мозаики составляет 180 нм. Установлено, что на уровень микродеформаций (ϵ) и плотность дислокаций внутри блоков (ρ_ϵ) в покрытиях TiN при их формировании преобладающее влияние оказывает ток дуги.

Из результатов испытаний износостойкости поверхностей трения игл с покрытием (таблица 5) видно что, во-первых, корреляции между степенью износа поверхностей трения игл и их микротвердостью не наблюдается. Во-вторых, применение покрытия TiN повышает износостойкость в условиях сухого трения и, в-третьих, использование смазки VM-1 резко снижает степень износа поверхности трения игл.

Таблица 5 – Результаты испытаний износостойкости рабочих поверхностей игл с покрытием TiN при вращении в подпятнике из лейкосапфира в течение 1 минуты.

Режим напыления	Условие трения	Толщина удаленного слоя материала, $\times 10^{-3}$ мм	Объем потерянного материала, $\times 10^{-3}$ мм ³	Линейная интенсивность изнашивания I, $\times 10^{-7}$	Удельный объем износа W, $\times 10^{-7}$ мм ² /кгс
$I_d=120$ А, $U_{cm}=160$ В	сухое	0,2	0,15	0,16	0,17
$I_d=140$ А, $U_{cm}=140$ В	сухое	0,55	0,46	0,42	0,50
$I_d=120$ А, $U_{cm}=160$ В	VM-1	0,027	0,02	0,02	0,024
$I_d=140$ А, $U_{cm}=140$ В	VM-1	0,14	0,12	0,11	0,13

В таблице 6 приведены результаты испытаний износостойкости (в условиях смазки VM-1) исходной иглы, иглы с покрытием TiN ($I_d=120$ А, $U_{cm}=140$ В), иглы после ИИ C^+ ($D=2,0 \cdot 10^{17}$ см⁻²) с подпятниками из нитрида бора и иглы с покрытием из нитрида титана с подпятником из лейкосапфира. При трении в контакте с подпятником из нитрида бора наименьшая интенсивность износа поверхности скольжения наблюдается у иглы с покрытием из нитрида титана. Интенсивность износа поверхности исходной и облученной игл находится примерно на одном уровне. Интенсивность износа поверхности скольжения иглы с TiN-покрытием в условиях смазки VM-1 при работе с подпятником из нитрида бора на порядок ниже, чем при работе с подпятником из лейкосапфира.

Таблица 6 – Результаты испытаний износостойкости рабочих поверхностей игл в подпятниках из нитрида бора и лейкосапфира в условиях смазки в течение 1 минуты.

Пара трения «игла-подпятник»	Толщина удаленного слоя материала, $\times 10^{-3}$ мм	Объем потерянного материала, $\times 10^{-3}$ мм ³	Линейная интенсивность изнашивания $I, 10^{-7}$	Удельный объем износа $W, 10^{-7}$ мм ² /кгс
TiN – нитрид бора	0	0	0	0
ИИ C ⁺ - нитрид бора	0,236	0,208	0,18	0,20
Ст. У10 – нитрид бора	0,171	0,144	0,16	0,18
TiN-лейкосапфир	0,010	0,010	0,01	0,01

На основании результатов проведенных исследований выбран оптимальный вариант высокоскоростной пары трения «игла-подпятник», при котором применяется игла с упрочняющим покрытием TiN, а в качестве материала для подпятника используется нитрид бора вместо лейкосапфира.

Литература

- 1 Ю.П.Тарасенко, В.А.Сорокин, Л.А.Кривина Модифицирование поверхности скольжения малогабаритных деталей пар трения методом нанесения TiN-покрытия //Материалы XLVII Межд. конф. «Актуальные проблемы прочности». 1-5 июля 2008, Н.Новгород, ч.2, с.157-159
- 2 И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977, 526 с.

Поступила: 22.01.11.