

## ВЛИЯНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПРОЦЕССЫ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

**В.М. Береснев**

*Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)*

Поступила в редакцию 23.11.2004

В данной работе приведены результаты исследований триботехнических характеристик многокомпонентных: Ti-Cu-N, Ti-Al-N, многослойных: TiN+б-Ti, TiN+TiC, TiC+TiN, TiN+БрАЖ9-4 покрытий. Исследования показали, что для некоторых покрытий включающий мягкий компонент обнаружено существование эффекта избирательного переноса. Показано, что устойчивое протекание нормального трения и износа обеспечивается за счет нанесения на рабочие поверхности многокомпонентных и многослойных покрытий.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Трение твердых тел представляет собой совокупность физико-механохимических, тепловых, электрических процессов, протекающих в тончайших поверхностных слоях при контактом взаимодействии материалов.

Для изучения внешнего трения, в работах [1, 2, 3] использовались микроскопические характеристики пластической деформации, при этом трение рассматривалось, как результат пластического деформирования тонких слоев металла. В работах [4, 5] для изучения напряженно-деформируемого состояния поверхностных объемов трущихся тел авторы использовали дислокационную теорию пластичности.

Исходя из обширного опубликованного экспериментального материала по изучению напряженно-деформируемого состояния поверхностных объемов трущихся тел различных материалов можно сделать вывод, что в тончайших поверхностных слоях  $1,0 \div 10$  нм происходит интенсивная и направленная деформация, в нижележащих слоях (100 и более мкм) имеет место волновой механизм распространения пластической деформации [6]. Пластическая деформация существенно изменяет физико-химическую активность поверхностных слоев контактирующих материалов. Роль этой активности в процессах трения и износа, а также изучения влияния граничного слоя смазки на механизм деформирования поверхностных слоев металла, рассмотрено в работах [7, 8].

Активация деформируемых объемов металла определяет кинетику протекания адгезионных процессов в зоне контактного взаимодействия трущихся металлов, следовательно, изменяя адгезионную активность материала, можно управлять процессами трения.

Анализ теоретических представлений, а также экспериментального материала позволил предложить следующий принцип управления трением и износом. С одной стороны – это наличие устойчивого граничного слоя смазки, как наиболее простого способа управления. С другой стороны модификация поверхностных слоев специальными легирующими элементами или нанесение многофункциональных (многокомпонентных, многослойных, композиционных) покрытий, что обеспечивает устойчивость протекания процессов нормального трения и износа при оптимальных значениях сил трения и скорости износа.

Исходя из этого, целью настоящей работы является минимизации нормального износа за счет нанесения многослойных, многокомпонентных покрытий на рабочие поверхности узлов трения.

### **МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Многокомпонентные, многослойные покрытия получали на установке «Булат». В качестве испаряемых материалов использовался титан марки ВТ-1-00, бронза БрАЖ9-4, медь

марки М1-00, алюминий АВ-000. Осаждение покрытий проводили в среде реакционного газа – азота. Покрытия наносили на образцы азотированной стали 38Х2МЮА. Температура подложки 520 °С, контролировалось хромель-алюмелевой микротермопарой. Структурные исследования покрытий проводились в серийном электронографе ЭГ-100М при ускоряющем напряжении 100 кВ. Исследования содержания элементов в образцах проводилась методом рентгеновского микроанализа при помощи прибора MAP-2 с абсолютной погрешностью 0,1%(мас). Микротвердость покрытий измерялось на приборе ПМТ-3. Общая толщина покрытий в зависимости от условий эксперимента изменялось от  $6 \div 10$  мкм.

Испытания на трение и износ проводили по схеме плоскость-цилиндр на машине трения СМЦ-2 в среде масло АМГ-10. Контролем служили, цилиндрические образцы из термообработанной стали Х12М (HRC64-69). Шероховатость цилиндрической поверхности не превышала  $R_a = 0,08$  мкм.

Основная серия экспериментов проводилась при скорости скольжения 1,3 м/с, продолжительность одного испытания 6 часов, нагрузка изменялось ступенчато.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

*Многокомпонентные покрытия* Ti-Al-N, Ti-Cu-N были получены путем одновременного распыление титанового и алюминиевого (медного) материала в среде газообразного азота при парциальном давлении  $2,0 \cdot 10^{-1}$  Па. Перед нанесением поверхность подложек подвергалась очистке ионами титана при давлении  $2,3 \cdot 10^{-3}$  Па. На основании теоретических рассуждений, а также предварительных экспериментов по получению покрытий Ti-Al-N, Ti-Cu-N, была выбрана схема осаждений, в которой алюминиевый или медный катод отделен от подложки ( $L \sim 500$  мм). С целью рационального уменьшения скорости осаждения, на пути ионного пучка Al, Cu поставлена специальная сетка, также в схеме конденсации покрытий была пред-

усмотрена возможность плавного регулирования угла наклона подложки к оси алюминиевого или медного катода.

Адгезию покрытий с подложкой определялась с помощью специально разработанной методики [9], основанной на совместной локальной пластической деформации покрытия и основы путем внедрения индентора твердомера Роквелла при нагрузке на индентор 1500Н. Результаты исследований - гезии покрытий, показали, что полученные покрытия Ti-Al-N, Ti-Cu-N обладают хорошей адгезией.

Изучение структуры поверхности полученных покрытий с помощью оптической, растровой микроскопии показало, что покрытия, полученные при разных углах наклона подложки, характеризуются наличием капельной составляющей, которая всегда присутствует в ионно-плазменных покрытиях.

Микротвердость покрытий Ti-Cu-N толщиной  $5,0 \div 6,0$  мкм полученных при  $P = 2,0 \cdot 10^{-1}$  Па,  $U_{cm} = 100$  В при содержание меди в покрытии  $2 \div 6\%$ мас составила 13,0 ГПа [10, 11]. Сравнение микрофотографий поверхности покрытий показывает, что с ростом угла (и, следовательно, с увеличением содержания Cu в покрытиях) увеличивается максимальный размер капельной составляющей, уменьшается микротвердость покрытий. Фазовый анализ показывает, что покрытие Ti-Cu-N состоит, главным образом, из твердого раствора меди в нитриде титана, о чем свидетельствует, во-первых, отсутствие линий, соответствующих другим фазам, и, во-вторых – уменьшение периода решетки фазы TiN по сравнению с покрытием, в котором меди нет; полученное значение периода решетки в исследуемом покрытии  $a = 0,412$  нм, меньше периода решетки чистого нитрида титана  $a = 0,4236$  нм [12].

Микротвердость покрытий Ti-Al-N толщиной 6,0 мкм при содержании алюминия в покрытии  $\sim 15\%$ мас ( $P = 2,0 \cdot 10^{-1}$  Па,  $U_{cm} = 100$  В) составила  $\sim 38$  ГПа. Фазовый анализ показал, что полученное покрытие

при таком содержании алюминия состоит из твердого раствора алюминия в нитриде титана. Расчет электроннограмм от покрытия Ti-Al-N показал, что покрытия представляют ГЦК-фазу с параметрами решетки  $a = 0,415$  нм.

Результаты испытаний покрытий при трении «покрытие – сталь Х12М», приведены в табл. 1.

Таблица 1

Триботехнические характеристики многокомпонентных покрытий

Покрытие	TiN	Ti-Al-N Al(10±15)%мас	Ti-Cu-N Al(2±6)%мас
Толщина, мкм	6,0	6,0	6,0
Средний коэффициент трения	0,13	0,064	0,048
Износ, $V \cdot 10^{-3}$ мм <sup>3</sup>	3,0	1,4	1,2
Критическая нагрузка задиробразования, Н	1100	1600	1400

Как видно из табл. 1 покрытия Ti-Al-N, Ti-Cu-N обладают низким коэффициентом трения и высокой критической нагрузкой задиробразования по сравнению с покрытием TiN. В процессе испытаний покрытий Ti-Cu-N, было зарегистрировано образования на поверхности покрытий Ti-Cu-N тонкой пленки красно-темного цвета (до испытаний цвет покрытий Ti-Cu-N золотисто-желтый, что соответствует цвету нитрида титана). Методом ионного послойного анализа было проведено изучение дорожек трения покрытий Ti-Cu-N, Ti-Al-N. Скорость травления для титана, алюминия, меди составило ~250Е/час. На рис. 1 приведены зависимости концентрации меди в приповерхностном слое покрытия Ti-Cu-N.

Как видно из приведенного рис. 1, в приповерхностном слое формируется однофазная гомогенная структура – пленка меди, которая в процессе трения переносится на сопрягаемую поверхность (рис. 2), что и определяет в нашем эксперименте режим избирательного переноса [13 – 15].

Электроннографические исследования структуры, образовавшиеся на поверхности

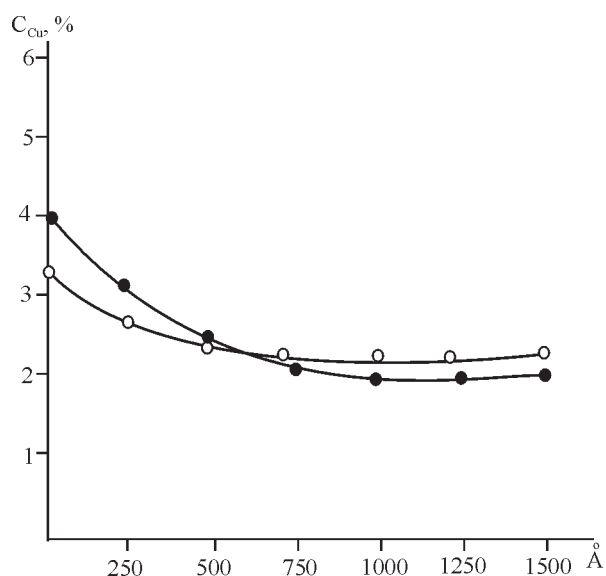


Рис. 1. Распределение концентрации меди в приповерхностном слое покрытия Ti-Cu-N: 1 – исходная поверхность; 2 – после трения.

трения, показывает, что пленка на поверхности имеет состав  $CuO \times Cu_2O$ .

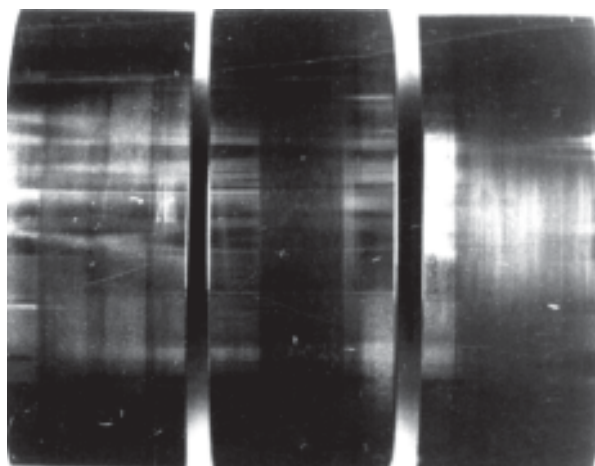


Рис. 2. Фотография износа контртел из стали 45 при трении по покрытию Ti-Cu-N.

Исследование поверхности трения Ti-Al-N показало, что в процессе трения в масле АМГ-10, также происходит формирование пленки на поверхности трения (рис. 3).

Электроннографические исследования поверхности трения показали, что на поверхности имеется алюминий с дисперсными включениями мелкокристаллической окиси  $\gamma-Al_2O_3$ . Эти включения имеют размер  $30 \div 150$  нм, по своему строению, структуре, которая образовалась на поверхности, близка к структуре дисперсно-упрочненного компо-

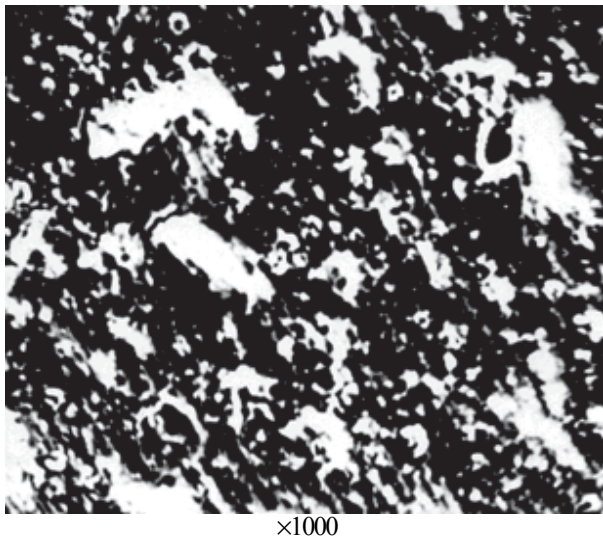


Рис. 3. Структура поверхности дорожки трения покрытия Ti-Al-N (растровая микроскопия).

зиционного материала, который обладает высокой пластичностью и прочностью.

Анализ приведенных выше результатов, свидетельствует, что за счет легирования покрытий на основе нитрида титана небольшим количеством меди, алюминия можно оптимизировать силы трения, т.е. реализовать нормальное трение при минимальной скорости изнашивания. При этом нормализация процесса связано с проявлением внешней формы эффекта Ребиндера [7], т.е. расширяется область внешнего трения.

*Многослойные покрытия* TiN+ $\alpha$ -Ti, TiN+БрАЖ9-4 наносились последовательной конденсацией нитрида титана и чистого титана, а также нитрида титана и бронзы [15, 17]. Основная серия экспериментов проводилась по изучению износостойкости при скорости скольжения 1,3 м/с, среда – масло АМГ-10, продолжительность одного испытания 6 часов; нагрузка изменялась ступенчато. В табл. 2 приведены результаты изучения трения и износа.

Сравнение приведенных результатов показывает, что наибольшей износостойкостью обладают покрытия TiN+ $\alpha$ -Ti, TiN+БрАЖ9-4. Эти покрытия характеризуются и наименьшим измеряемым значением износа. Анализируя полученные результаты исследований можно сделать вывод, что в процессе трения многослойных покрытий TiN+ $\alpha$ -Ti, TiN+БрАЖ9-4 по стали проявляется меха-

Таблица 2  
Триботехнические характеристики многослойных покрытий

Конструкция покрытий	TiN	TiN+ $\alpha$ -Ti	TiN+БрАЖ9-4	TiC+TiN	TiN+TiC
Кол. слоев	1,0	0,8+0,2	0,8+0,2	2,0	2,0
Толщ., мкм	8,0	8,0	5,0+3,0	4,0+4,0	4,0+4,0
НТР	0,17	0,11	0,09	0,13	0,12
$\Delta f_{\text{тр}}$	0,13 – 0,23	0,09 – 0,11	0,103 – 0,09	0,22 – 0,11	0,17 – 0,14
h, мкм	3,8	1,7	2,6	3,5	4,5
$V \cdot 10^{-3}$ , мм <sup>3</sup>	8,0	4,2	5,6	19	25
$\Delta V \cdot 10^{-3}$ , мм <sup>3</sup>	1,5 – 11,0	3,0 – 8,0	5,0 – 9,0	3 – 70	2 – 110
Крит. нагр. при испыт. на задир, Н	1100	1240	1550	1000	1000

**Примечание:**  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $\Delta f_{\text{тр}}$  – усредненные значения для каждого покрытия;  $V$  – средний объемный износ покрытия за время испытаний;  $\Delta V$  – разброс значений объемного износа;  $h$  – максимальная глубина канавки износа.

низм избирательного переноса, на поверхности формируются пластическая пленка, которая обеспечивает условия легкого перемещения контактирующих поверхностей, малое значение коэффициента трения и износа. Известно, что наличие на поверхности трения более мягкого материала по сравнению с глубже лежащими слоями является необходимым условием процесса нормального трения [18].

На основании выше изложенного экспериментального материала, а также анализа теоретических представлений [19] – управления процессами трения можно свести к следующей функциональной схеме (рис. 4).

Таким образом применение многокомпонентных, многослойных покрытий расширяет диапазон нормального трения, позволяет влиять на контактные процессы в зоне трения, а значит управлять скоростью износа и силой трения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для систем, включающий мягкий компонент (Ti-Cu-N, Ti-Al-N) обнаружено существование эффекта избирательного пе-

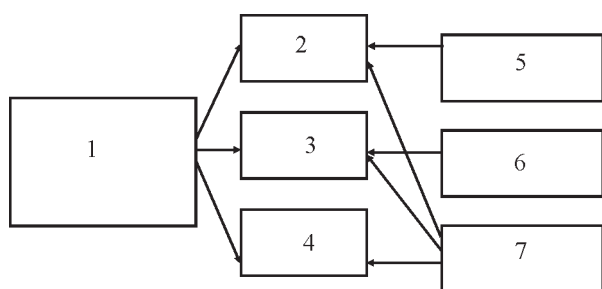


Рис. 4. Функциональная схема управления процессами трения и износа: 1 – смазочные материалы; 2 – специальное модифицирование поверхностных слоев трения; 3 – многослойные, многокомпонентные, композиционные покрытия; 4 – физико-механохимическая активность поверхностных слоев; 5 – нормальный износ; 6 – минимизация нормального износа; 7 – оптимизация износа.

реноса в процессе работы пар трения. Мягкий компонент (Cu, Al) переносится на контактирующую поверхность, что приводит к снижению коэффициента трения, повышает износостойкость и увеличивает критическую нагрузку задиорообразования. Такое явление зафиксировано также для многослойных покрытий.

2. Многокомпонентные покрытия Ti-Cu-N с содержанием Cu в покрытии 2 ÷ 6% мас., Ti-Al-N с содержанием Al в покрытии 10 ÷ 15% мас. обеспечили снижение износа в 2,5 раза по сравнению с TiN, повышение критической нагрузки задиорообразования на 20 ÷ 30% по сравнению с TiN.
3. Многослойные покрытия TiN+α-Ti, TiN+BrAЖ9-4, почти 1,5 – 1,9 раза уменьшают износ и увеличивают критическую нагрузку задиорообразования на 10 ÷ 30% по сравнению с TiN.
4. Предложена функциональная схема управления процессами трения и износа, причем устойчивое протекание процессов нормального трения и износа обеспечивается за счет нанесения на рабочие поверхности многокомпонентных, многослойных покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280с.
2. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел./Пер. с англ./ – Машиностроение, 1968. – 543 с.

3. Костецкий Б.И., Натасон М.Э., Бершадский Л.И. Механохимические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 170 с.
4. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 128 с.
5. Поверхностная прочность материалов при трении. /Под. ред. Костецкого Б.И., Носовского И.Г., Караулова А.К., Бершадского Л.И. и др./ – К.: Техніка, 1976. – 292 с.
6. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные урони деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985. – 229 с.
7. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения// Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108, Вып. 1. – С. 3-42.
8. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии/Пер. с англ./ Под ред. А.И. Свиреденко/. – М.: Машиностроение, 1986. – 359 с.
9. Мацевитый В.М., Романова Л.М., Береснев В.М. Способ контроля качества адгезии износостойких покрытий// Тез. доклад. научн.-техн. конф. «Применение инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов» – Краснодар. – 1983. – С. 92-93.
10. Режущий инструмент: А.с. 1223523 СССР, МКИ С23С1/00/Мацевитый В.М., Романова Л.М., Береснев В.М. – № 3771042; Заявлено 13.07.84. Опубл. 08.12.85.
11. Beresnev V.M. Ion-plasma multicomponent films layers//International conf. MPSL Sumy (Ukraine). – 1993 – P. 43.
12. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов/Пер. с англ. /Под ред. П.В. Бельда/. – М.: Мир, 1974. – 294 с.
13. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. – М.: Транспорт, 1969. – 100 с.
14. Поляков А.А. Опыт исследования диссипативной структуры избирательного переноса в металлической пленки при трении//Металлы. – 1992. – № 2. – С. 135-149.
15. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость метала. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
16. Федоренко А.И., Береснев В.М., Бра тушка С.Н., Коваленко И.А. Исследование механических свойств износостойких покрытий, полученных ионно-плазменным осаждением/Тез. докл. Науч.-техн. конф. “Современная

- технология упрочнения, восстановления и механической обработки деталей с покрытиями” – К.: – 1993. – С. 59-60.
17. Мацевитый В.М., Полянин Б.А., Береснев В.М., Удовенко Е.С. Нанесение бронзового покрытия методом вакуумно-плазменной конденсации//Авиационная промышленность. – 1985. – № 8. – С. 60.
18. Крагельский И.В. Трени и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
19. Чихос Х. Системный анализ в трибонике: / Пер. с англ./ – М.: Мир, 1982. – 351с.

**ВПЛИВ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ТА  
БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ  
НА ПРОЦЕСИ ТЕРТЯ І ЗНОСУ**

**В.М. Береснев**

У даній роботі наведені результати досліджень триботехнічних характеристик багатоконпонентних: Ti-Cu-N, Ti-Al-N, багат шарових: TiN+ $\alpha$ -Ti, TiN+TiC TiC+TiN TiN+Браж9-4 покриттів. Дослідження показали, що для деяких покриттів, які включають м'який компонент виявлено існування ефекту вибіркового переносу. Показано, що стійке протікання нормального тертя та зносу забезпечується за рахунок нанесення на робочі поверхні багатоконпонентних і багат шарових покриттів.

**DOMINANCE OF MULTICOMPONENTS  
AND MULTIAYER COVERAGES  
ON FRICTION PROCESSES AND WEAR**

**V.M. Beresnyev**

In given work are brought the researches results tribotechnics of descriptions multicomponents Ti-Cu-I, Ti-Al-I, multilayers: TiN+ $\alpha$ -Ti, TiN+TiC, TiC+TiN, coverages TiN+БрАЖ9-4. Researches showed, that for some coverages including soft component displayed existence of effect of electoral transfer. Shown, that a steady flowing of normal friction and wear provides for account of causing on working surfaces of multicomponents and multilayers coverages.