

этой точке нарушается разложение для коэффициента  $k^2$ , определяемое соотношением (4).

Однако, наряду с возможностью построения решения в виде суперпозиции двухволновых составляющих, остается вопрос об устойчивости таких решений [5].

Известно, что для решений в виде одиночных волн, по крайней мере, с точностью до членов, определяемых функциями  $\bar{\phi}^{(0)}$  и  $\bar{\phi}^{(2)}$ , можно найти область значений  $\{\alpha, \lambda\}$ , в которой они устойчивы. Здесь  $\lambda$  – длина «замороженной» волны; фактически, это период пространственной структуры решения. В тоже время решения двухволнового типа не устойчивы.

Описанную противоречивую ситуацию можно рассматривать как указание на то, что используемый метод построения решений в виде «замороженных» волн, основанный на применении теории возмущений, оказывается не достаточно эффективным, несмотря на то, что в задаче имеется естественный малый параметр  $\varepsilon$ . В результате линеаризации задачи теряется физическое содержание модели. Для поиска решения необходимо использовать другие методы, применяемые для существенно нелинейных уравнений.

УДК 681.2

## СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ Ti-N В СОСТАВЕ ПОВЕРХНОСТНО-ЛЕГИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НА СТАЛИ

Ковальчук А.В., Константинов С.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Повышение срока службы деталей приборов с одновременной минимизацией их массогабаритных параметров является актуальной и перспективной задачей современного приборостроения. В вопросах проектирования и обработки деталей, работающих в условиях трения, значительную роль играют материаловедческие аспекты. Сегодня одним из приоритетных направлений современного материаловедения применительно к вопросам упрочнения деталей приборов, прецизионного инструмента и других является разработка упрочняющих покрытий, защищающих рабочую поверхность от изнашивания, коррозии и механических повреждений. Особое внимание уделяется наноструктурированным многокомпонентным покрытиям ввиду уникального сочетания их свойств. За последнее десятилетие был разработан ряд твердых покрытий на основе металлоподобных тугоплавких химических соединений переходных металлов – нитридов, карбидов, боридов и других. Такие покрытия на стальной поверхности обеспечивают высокую нанотвердость и износостойкость, однако имеют узкую область практического применения, так

1. Carter, W.G. Variational methods for microstructural-evolution theories / W.G. Carter, J.E. Taylor, J.W. Cahn // JOM-Journal of the minerals, metals & materials society. – 1997. – V. 49, № 12. – P. 30-36.
2. Saito, Y. Anisotropy effect on step morphology described by Kuramoto-Sivashinsky equation / Y. Saito, M. Uwaha // J. Phys. Soc. Japan. – 1996. – V. 65, № 11. – P. 3576-3581.
3. Yeung, C. Phase separation dynamics in driven diffusive systems / C. Yeung, T. Rogers, A. Hernandes-Machado, D. Jasnow // J. Statist. Physics. – 1992. – V. 66, № 3-4. – P. 1071-1088/
4. Golovin, A.A. Convective Cahn-Hilliard models: From coarsening to roughening / A.A. Golovin, A.A. Nepomnyashchy, S.H. Davis, M.A. Zaks // Phys. Rev. Lett. – 2001. – V. 86, № 8. – P. 1550-2001.
5. Benilov, E.S. Stability of frozen waves in the modified Cahn-Hilliard model / E.S. Benilov, W.T. Lee, R.O. Sedakov // Phys. Rev. E – 2013. – V. 87, № 3. – 032138.
6. Liu, F. Dynamics of phase separation in block copolymer melts / F. Liu, N. Goldenfeld // Phys. Rev. A. – 1989. – V. 43, № 9. – P. 4805-4810.

как их эксплуатационные свойства ограничиваются усилием и нагрузкой, которую может выдерживать покрытие без продавливания. Следовательно, эффективные характеристики системы «конструкционная сталь – PVD покрытие» в большей степени зависят от свойств материала основы.

Композиты типа покрытие-подложка до сих пор слабо описаны теоретически, и важно выявить общие закономерности между микроструктурными особенностями и макроструктурными характеристиками [1, 2]. Следует отметить, что применительно к вакуумным PVD и CVD покрытиям, каждое покрытие обладает своим уникальным набором свойств для каждого конкретного сочетания с подложкой [3, 4]. Такие данные представляют значительный интерес.

Цель работы заключалась в установлении влияния предварительной упрочняющей химико-термической обработки на дюрометрические и трибологические свойства слоистых систем «сталь – PVD покрытие на основе TiN».

В ходе работы были исследованы микро- и нанотвердость PVD покрытий на основе TiN ле-

гированных алюминием на отожженных стальных подложках и подложках, упрочненных в результате химико-термической обработки.

Испытаниям подвергали образцы с покрытиями на подложках из упрочненной в результате карбонитрации (550–600 °С, 7 ч) и не упрочненной стали 12X18H9T.

Значения микротвердости образцов получали при измерении твердости по методу восстановленного отпечатка при нагрузке на индентор (0,09–0,98 Н).

Установили, что микротвердость образцов после поверхностного упрочнения химико-термической обработкой и нанесением покрытия TiAlN 1,2–1,5 раза превышает соответствующий показатель после упрочнения посредством способа, включающего нанесение покрытия TiN и в 1,4–1,8 раза – включающего азотирование вместо карбонитрации. Это свидетельствует о том, что поверхностное упрочнение с одновременным насыщением стальной основы азотом и углеродом и легирование алюминием вакуумного покрытия повышает эффективную твердость слоистой системы и несущую способность непосредственно покрытия, которое вносит более существенный вклад в общую твердость поверхностной композиции.

Таблица 1 – Результаты дюрометрических испытаний

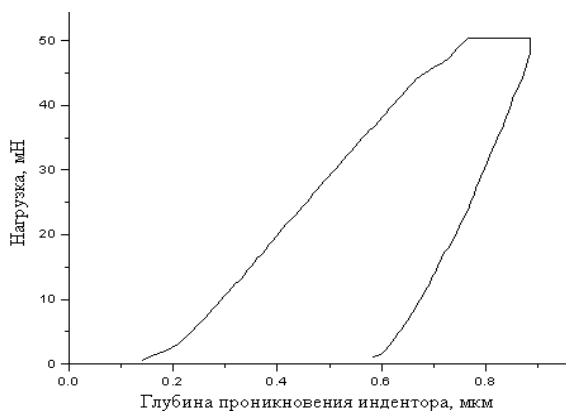
Способ упрочнения	Микротвердость, МПа	Нанотвердость, МПа
Азотирование и нанесение покрытия TiN	14170	21040
Карбонитрация и нанесение покрытия TiN	16140	23950
Карбонитрация и нанесение покрытия TiAlN	19770	52880

Это также подтверждают значения нанотвердости, которые показывают повышение нанотвердости покрытий в 1,7–2,5 раза. Это делает научно обоснованным снижение толщины покрытий в таких слоистых системах.

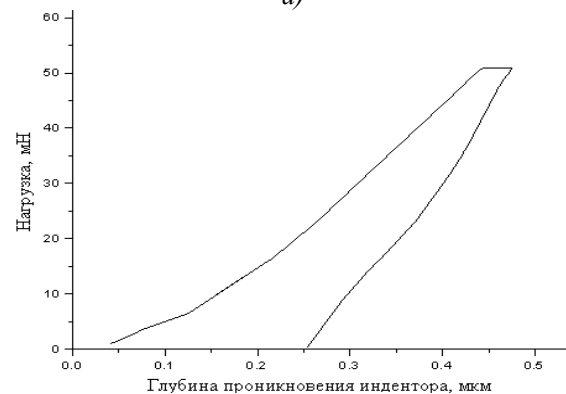
Значения нанотвердости получали при обработке кривых нагружения-разгрузки, полученных на приборе Nanoindenter G200 (MES Systems, USA) по методике Оливера-Фарра, с применением трехгранного алмазного индентора Берковича с радиусом закругления при вершине 20 нм при вдавлении наноиндентора на глубину до 200–300 нм.

Угол наклона разгрузочной кривой (1а) свидетельствует о хороших упругих свойствах покрытия, однако нанотвердость относительно низкая, покрытие продавливается. Нанотвер-

дость – 28070 МПа, модуль упругости – 770 ГПа, жесткость – 2,47 Н/м. Малый угол наклона разгрузочной кривой (1б) свидетельствует о высокой упругости покрытия и его преимущественно вязком характере разрушения под действием нагрузки индентора. Нанотвердость – 52880 МПа, модуль упругости – 870 ГПа, жесткость – 1,48 Н/м.



а)



б)

а) – покрытие TiAlN на стали 12X18H9T;  
б) – покрытие TiAlN на стали 12X18H9T после низкотемпературной нитроцементации  
Рисунок 1 – Кривые нагружения-разгрузки образцов с покрытиями

Трибологические испытания проводили по схеме сухого трения скольжения «диск – плоскость», износостойкость (таблица 2) определяли по величине линейного износа за 1 ч при нормальной нагрузке 0,1 Н. Установили, что предварительная карбонитрация увеличивает время до появления остаточной деформации в подложке и несколько нивелирует влияние разности в твердости между подложкой и покрытием на эффективную твердость слоистой системы, а сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое подложки, полученные в результате карбонитрации, увеличивают время до появления усталостных трещин. Также при наступлении начала последовательного разрушения покрытия упрочненная подложка тормозит процесс развития очага разрушения и при полном разрушении

покрытия под контртелом работает дольше не упрочненной.

Износостойкость образцов по величине линейного износа после карбонитрации и нанесения покрытия TiAlN в 1,3–1,4 раза превышает соответствующий показатель после нанесения покрытия TiN и в 1,5–1,6 раза – покрытия TiN на азотированной подложке. Очевидно, что по величине потери массы эта разница больше.

Таблица 2 – Результаты трибологических испытаний

Способ упрочнения	Линейный износ, мкм
Азотирование и нанесение покрытия TiN	652
Карбонитрация и нанесение покрытия TiN	577
Карбонитрация и нанесение покрытия TiAlN	412

Таким образом, анализируемая система «PVD покрытие – упрочненная стальная основа» представляет собой новый композиционный материал, характеризующийся свойствами, в отдельности недостижимыми ни материалом покрытия, ни материалом подложки.

УДК 681.7.023.72

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОДНОВРЕМЕННОЙ ДВУСТОРОННЕЙ ОБРАБОТКИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЕНИСКОВ

Козерук А.С., Кузнечик В.О., Шамкалович В.И., Лаптева Е.О., Василевич А.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Предлагается высокоэффективная технология одновременной двусторонней обработки прецизионных отрицательных менисков, относящихся к маложестким труднообрабатываемым оптическим деталям.

С целью создания методики, которая позволила бы рассчитать наладочные параметры станка, разработана математическая модель процесса двусторонней обработки маложестких линз. При этом за основу принята гипотеза Ф. Престона [1], в соответствии с которой величина съема припуска пропорциональна скорости  $V$  скольжения детали относительно инструмента и давлению  $P$  в зоне контакта притирающихся поверхностей.

Определим выражение для расчета скорости скольжения  $V_M$  в произвольной точке  $M$  зоны контакта инструмента 1 и сферической детали 2 (рис. 1) с радиусом кривизны  $R$ . Вектор этой скорости запишем в виде [2]

$$\vec{V}_M = \vec{V}_M^a - \vec{V}_M^E, \quad (1)$$

Предварительная химико-термическая обработка стальной подложки позволила до 7 раз повысить микротвердость и до 2,3 раза износостойкость рабочей поверхности композита. Это позволяет сделать научно обоснованным снижение толщины покрытий в рассмотренных слоистых системах без потери эксплуатационных свойств.

1. Воронин Н.А. Абразивная стойкость и несущая способность вакуумных ионно-плазменных покрытий. // Трение и износ, 1998. – Т.19 – №5. – С. 616–622.
2. Константинов В.М. Оценка износостойкости покрытия TiN на упрочненной и не упрочненной основе / В.М. Константинов, Ф.Ф. Комаров, А.В. Ковальчук, В.В. Пилько // Вестник БарГУ, 2013. – С.102–108.
3. Хоккинг М., Вассантари В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 518 с
4. Константинов В.М. Повышение жесткости металлической основы систем "конструкционная сталь – нитрид титана" / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук, Г.А. Ткаченко // Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.: в 2 ч. – Минск: Белорусская наука, 2013. – Вып. 36, ч.2. – С. 152–161.

где  $\vec{V}_M^a = \vec{\omega}_a \times \vec{R}_M$  и  $\vec{V}_M^E = \vec{\omega}_E \times \vec{R}_M + \vec{V}_M^{B-B}$  – векторы абсолютной скорости соответственно детали и инструмента в рассматриваемой точке, вращающихся с угловыми скоростями  $\omega_A$  и  $\omega_E$

;  $\vec{R}_M$  – вектор, начало которого расположено в центре  $O$  кривизны сферической поверхности, а конец – в точке  $M$ ;  $\vec{V}_M^{B-B}$  – вектор скорости возвратно-вращательного движения инструмента.

Из анализа рис. 1 видно, что центр  $C$  рабочей поверхности верхнего инструмента в любой момент времени обработки принадлежит, с одной стороны, сфере радиуса  $l_{AC}$  с центром в точке  $A$ , с другой – сферической поверхности детали. Пересечение двух сфер определяет окружность, плоскость которой перпендикулярна линии, соединяющей их центры. Таким образом, точка  $C$  в возвратно-вращательном движении перемещается по дуге окружности с центром на линии  $AO$  в плоскости, перпендикулярной этой линии. То же самое можно сказать применительно к любой