

УДК 621.793

**В. С. Антонюк, Е. Б. Сорока, В. И. Калиниченко** (г. Киев)

### **Обеспечение адгезионной прочности в системе основа—покрытие в условиях контактного нагружения**

*Рассмотрены пути определения геометрических параметров покрытия дискретного типа с точки зрения соблюдения адгезионной прочности композиции основа—покрытие. При расчете напряженно-деформированного состояния использовали элемент твердосплавного инструмента с вакуум-плазменным покрытием в условиях контактного нагружения с учетом сил трения.*

**Ключевые слова:** покрытия, контактные нагрузки, поверхность адгезионного контакта, адгезионная прочность.

**Введение.** Увеличение срока службы инструментов и деталей машин, работающих в жестких условиях высоких контактных нагрузок, температур и интенсивного трения все больше связывают с модифицированием их поверхности. В силу высокой твердости, обеспечивающей надежную защиту от износа, снижения коэффициента трения, стойкости к окислительному износу и теплостойкости все более широкое распространение для модифицирования рабочих поверхностей режущего инструмента находят вакуум-плазменные покрытия на основе нитридов и карбидов тугоплавких металлов [1]. Вместе с тем, традиционный сплошной слой покрытия в процессе эксплуатации разрушается. Избежать разрушения покрытия на режущем инструменте в результате нарушения когезионной (растрескивания) и адгезионной (отслоения) прочности можно, заменив сплошной слой покрытия на прерывистый (дискретный) [2]. Высокая когезионная и адгезионная стойкость поверхности с покрытием дискретного типа достигается ограничением нормальных напряжений в самом покрытии и касательных на поверхности раздела основа—покрытие за счет изменения конструктивных параметров покрытий, исходя из их физико-механических свойств и режимов нагружения [3]. Несмотря на то, что возросшее применение режущего и штампового инструмента с покрытиями, с одной стороны, и деталей с покрытиями, обрабатываемых инструментом, с другой, обуславливает необходимость решения контактной задачи и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) для деталей с модифицированной поверхностью, влияние параметров покрытия в условиях контактных нагрузок и интенсивного трения на напряженность поверхности адгезионного контакта, а значит, и на прочность сцепления, изучено недостаточно.

Существующие работы, в основном, связаны с анализом НДС детали с покрытием при воздействии индентора (обработке штамповым инструментом) с учетом трения на контактной поверхности [4—6]. В этих работах показано, что напряженное состояние на поверхности адгезионного контакта основа—покрытие зависит от толщины слоя покрытия, его упругих характеристик и коэффициентов трения. Авторами [7] при решении задачи о контакт-

ном взаимодействии жесткого штампа с упругой полуплоскостью с покрытием винклеровского типа показано, что неравномерность толщины покрытия существенным образом влияет на распределение контактных давлений.

Определению с использованием положений механики разрушения условий разрушения поверхности с покрытием при циклическом контакте трения посвящена работа [8]. Показано, что преимущество имеет покрытие с большей податливостью, которое рассеивает нагрузку и уменьшает концентрацию напряжений. Подходы механики разрушения использованы также в [9], где отслоение покрытия по поверхности раздела основа—покрытие моделируется погруженной трещиной.

Исследование зависимости касательных напряжений на границе подложки и тонкого мягкого покрытия от его толщины при решении двумерной задачи о контакте жесткого цилиндра с двухслойным упругим основанием приведено в [10].

Показано, что применение градиентных покрытий, в которых модули упругости убывают постепенно от поверхности контакта к подложке, значительно снижает напряжение на поверхности раздела покрытия и подложки в условиях вдавливания с трением [11] и скользящих контактов, подвергающихся поверхностному нагружению [12].

Авторы [13, 14] при решении контактной задачи показали, что характер распределения напряжений, в том числе на границе раздела основы с покрытием, наряду с параметрами толщины и упругими характеристиками покрытия, зависит от плоскости контакта и относительной площади областей нагружения.

Ситуация, рассматриваемая в данной статье, принципиально отличается от описанных в литературе не столько тем, что покрытие нанесено на инструмент, сколько тем, что несплошность контакта зависит также от размеров дискретного участка покрытия. Это обуславливает необходимость постановки и рассмотрения задачи о контактном нагружении дискретного участка покрытия на инструменте.

Целью работы является минимизация напряженности поверхности адгезионного контакта основа—покрытие при контактном нагружении с трением.

**Методика, результаты и обсуждение.** Применение современных численных методов, например, таких как метод конечных элементов, позволяет рассчитывать НДС деталей и режущего инструмента с покрытиями с учетом эксплуатационных нагрузок [15]. Построение и расчет моделей проводили в лицензионном конечноэлементном комплексе MSC VisualNastran for Windows, выбор которого обусловлен относительной простотой и значительной универсальностью. Данный комплекс имеет все необходимые инструменты для подготовки и проведения полного цикла моделирования. Для рассмотрения выбран элемент твердотельной модели режущего инструмента из твердого сплава ВК8 с вакуум-плазменным покрытием дискретного типа. Рассматривали одну из симметричных частей модели основа—дискретное покрытие, которую разбивали на гексагональные конечные элементы, имеющие меньшие размеры в области непосредственного контактного взаимодействия покрытия с основой. Формирование покрытия осуществляли с применением специальных “масок” с ячейками различной формы и размеров, что позволяло создавать покрытия с заданными геометрическими параметрами на установке типа ННВ-6,6-И1 [16].

Для расчета напряженно-деформированного состояния участка поверхности с покрытием рассматривали элемент твердосплавного инструмента с уча-

стком вакуум-плазменного покрытия в форме квадрата со стороной  $D$  толщиной  $h$  в условиях контактного нагружения  $q$  (рис. 1).

Проведенный расчет позволил установить, что на поверхности адгезионного контакта величины касательных напряжений  $\tau_{\text{адг}}$ , ответственных за отслоение покрытия от основы, максимальны по краям дискретного участка и зависят от его размеров (рис. 2). Значения максимальных касательных напряжений на поверхности адгезионного контакта сначала увеличиваются с ростом величины дискретного участка, а затем, достигнув наибольшего значения, начинают уменьшаться.

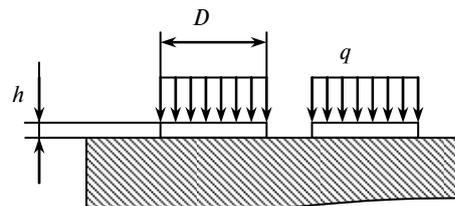


Рис. 1. Схема контактного нагружения элемента с покрытием дискретного типа.

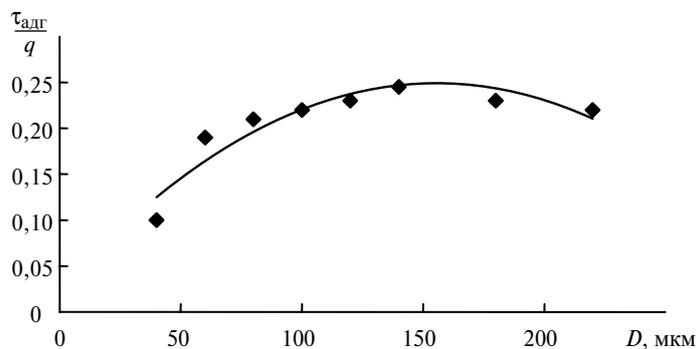


Рис. 2. Зависимость оптимальной величины максимальных касательных напряжений  $\tau_{\text{адг}}$  от размеров дискретного участка  $D$ .

Объяснить эту тенденцию можно тем, что максимальные касательные напряжения возникают на некоторой глубине, пропорциональной размеру площадки контакта. С увеличением участка покрытия максимум напряжений углубляется в основу на расстояние  $a$ , а после достижения размером дискретного участка некоторого значения величина напряжений на поверхности адгезионного контакта начинает уменьшаться. При этом размер участка покрытия ограничен сверху величиной, соответствующей предельным эквивалентным напряжениям для материала основы (максимум эквивалентных напряжений, рассчитанных по четвертой теории прочности, наблюдается на той же глубине, что и максимум касательных). Напротив, уменьшение размеров дискретного участка приводит к тому, что максимум напряжений приближается к поверхности адгезионного контакта и может наблюдаться как на ней, так и в самом покрытии (рис. 3). Анализ полученных зависимостей дает возможность ограничить размер дискретного участка сверху и снизу. Это позволит предотвратить адгезионное отслоение путем снижения величины касательных напряжений на поверхности адгезионного контакта и разрушение основного материала за счет уменьшения максимума эквивалентных напряжений в глубине основы.

Рассмотрено также влияние размеров дискретного участка и величин коэффициентов трения на напряженность поверхности адгезионного контакта при наличии касательной составляющей нагружения (силы трения) с учетом коэффициента трения  $\mu$  (рис. 4).

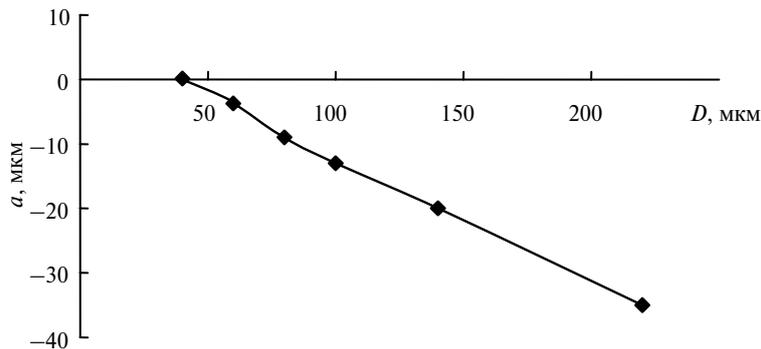


Рис. 3. Зависимость расстояния от поверхности контакта до места возникновения максимальных касательных напряжений  $a$  от размера дискретного участка  $D$ .

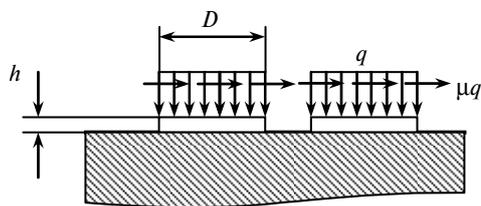


Рис. 4. Схема контактного нагружения элемента с покрытием дискретного типа при наличии касательной составляющей нагружения.

Анализ полученных результатов (рис. 5) показывает, что возрастание коэффициента трения приводит к перераспределению касательных напряжений. Так, с ростом силы трения максимальные касательные напряжения приближаются из глубины материала основы к поверхности адгезионного контакта, переходят в сам дискретный участок покрытия, а далее и на его поверхность.

Увеличение коэффициента трения приводит также к тому, что максимум касательных напряжений смещается в направлении действия силы трения, а в плоскости адгезионного контакта касательные напряжения распределены вдоль всей поверхности контакта.

На основе расчетных данных построены зависимости отношения максимальных касательных напряжений на поверхности адгезионного контакта  $\tau_{\text{адг}}$  к интенсивности приложенной нагрузки  $q$  для различных размеров дискретного участка и коэффициентов трения (рис. 6, 7). При этом коэффициент трения зависит от типа покрытий и материала контртела [17—21].

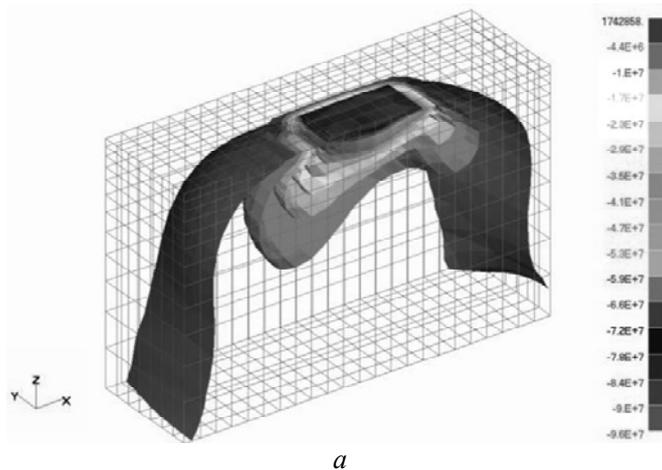
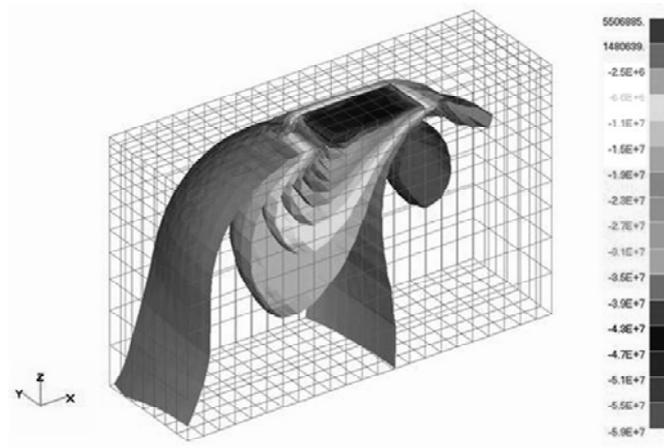
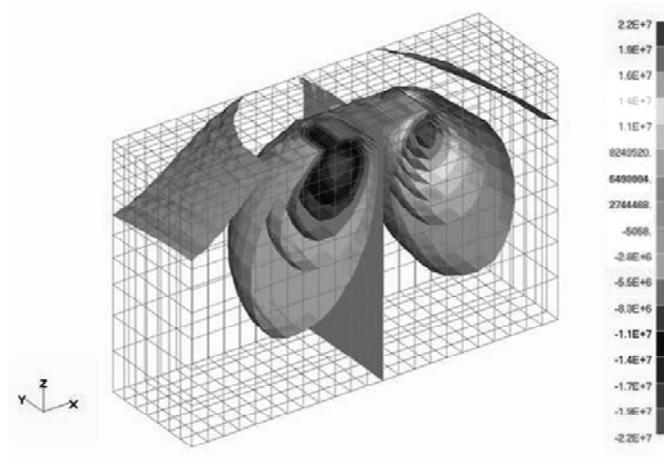


Рис. 5. Исоповерхности поля касательных напряжений от действия нормальной и касательной нагрузки на дискретном участке размером  $D = 120$  мкм при интенсивности контактного нагружения  $q = 100$  МПа:  $\mu = 0,7$  (а),  $0,5$  (б),  $0$  (в).



б



б

Рис. 5. (Продолжение).

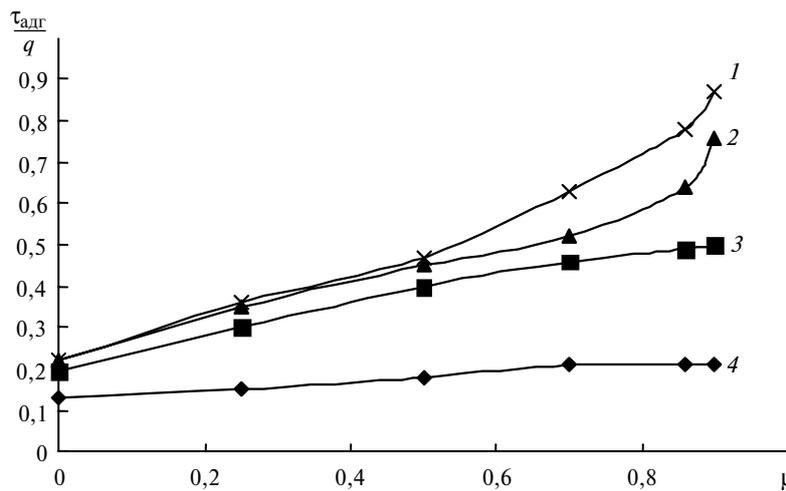


Рис. 6. Зависимость относительных касательных напряжений на поверхности адгезионного контакта от величины коэффициента трения для дискретных участков размером  $D = 240$  (1), 120 (2), 60 (3), 40 (4) мкм.

Анализ полученных зависимостей показывает, что выбор геометрических параметров износостойкой дискретной поверхности должен осуществляться с учетом материалов фрикционной пары. Показано, что напряженность адгезионного контакта для участков размером до 40 мкм практически не зависит от величины коэффициента трения, а с увеличением размеров дискретного участка влияние величины коэффициента трения на напряженность адгезионного контакта возрастает.

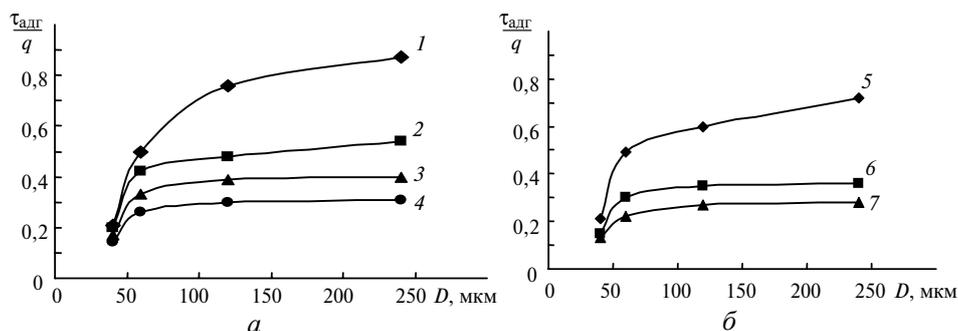


Рис. 7. Зависимость относительных касательных напряжений на поверхности сцепления покрытия с основой от величины дискретного участка в условиях фрикционного контакта: TiN (а) с контртелом из углеродистой (1) и хромистой (2) стали оксида алюминия (3), хромистой стали с MoS<sub>x</sub> в покрытии (4); Ti(C, N) (б) с контртелом из углеродистой стали (1), твердого сплава WC83Co17 (2), оксида алюминия (3).

В связи с тем, что для деталей фрикционных пар и режущего инструмента широко применяют покрытия на основе соединений титана, таких как нитриды и карбонитриды, исследовали зависимости величины касательных напряжений на поверхности адгезионного контакта основа—покрытие от величины дискретных участков для покрытий TiN, Ti(C, N) при обработке конструкционных материалов (см. рис. 7). Рассматривали конкретные фрикционные контакты покрытие—контртело с присущими им значениями коэффициентов трения (таблица) [18, 19, 21].

#### Значения коэффициентов трения во фрикционных контактах покрытие—контртело

Покрытие	Контртело				
	Сталь 45	Сталь 40X	WC83Co17	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сталь 45 с MoS <sub>x</sub>
TiN	0,9	0,6	—	0,35	0,15
Ti(C, N)	0,8	—	0,25	0,12	—

Результаты проведенных расчетов позволяют установить зависимость напряженности поверхности адгезионного контакта от величины дискретных участков покрытия и коэффициентов трения. Таким образом, можно прогнозировать напряженность поверхности сцепления покрытия с основой для разных типов покрытий и разных размеров дискретных участков и обеспечивать адгезионную прочность композиции основа—покрытие.

Следует отметить, что использованы значения коэффициентов трения для сплошных покрытий. Полученные предварительные результаты свидетельствуют о том, что изменение условий контакта в системе дискретное покры-

тие—контртело приводит к изменению величины коэффициента трения. Так, было обнаружено, что при трении покрытия TiN по стали 40X дискретизация покрытия приводит к уменьшению коэффициента трения в 1,3 раза. Очевидно, это обстоятельство следует учитывать в расчетах по определению напряженно-деформированного состояния рабочей поверхности с покрытием, для чего необходимо провести испытания по определению величины коэффициента трения при контакте дискретномодифицированных поверхностей с контртелами из различных материалов.

### Выводы

Проведенные расчеты позволили установить зависимость между величиной и характером распределения касательных напряжений в системе основа—покрытие для твердосплавной режущей пластинки с вакуум-плазменными покрытиями дискретного типа в зависимости от размеров дискретных участков и типов покрытий.

Результаты исследований позволяют выбрать оптимальные геометрические параметры и тип покрытия, дающие возможность предотвратить разрушение поверхности режущего инструмента в результате отслоения покрытия от основы.

1. *Klocke F., Krig T.* Coated tools for metal cutting — features and applications // *Ann. CIRP.* — 1999. — **48**, N 2. — P. 515—525.
2. *Ляшенко Б. А., Мовшович А. Я., Долматов А. И.* Упрочняющие покрытия дискретной структуры // *Технол. системы.* — 2001. — № 4 (10). — С. 17—25.
3. *Антонюк В. С., Ляшенко Б. А., Сорока Е. Б.* Выбор параметров покрытий дискретной структуры при модификации поверхности режущего инструмента // *Упрочняющие технологии и покрытия.* — 2005. — № 3. — С. 49—50.
4. *Oda J., Kubota T., Abe S.* Approximate solution of the elastik contact problem between film-coated bodies // *Nihon kikai gakkai ronbunshu. A = Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A.* — 1993. — **59**, N 567. — P. 2581—2586.
5. *Shibuay T., Inoue H., Kawamura M., Kishimoto K.* Axisymmetric frictional contact problem for elastic half-space with surface layer // *Ibid.* — 1994. — **60**, P. 575. — P. 1572—1578.
6. *Третьяков Е. М.* Контактные нагрузки при внедрении плоского пуансона в пластическую полуплоскость с поверхностным упрочненным слоем // *Пробл. машиностр. и надеж. машин.* — 2001. — № 5. — С. 62—70.
7. *Александров В. М., Пашовкин Ю. Н.* Контактная задача для полуплоскости с покрытием переменной толщины // *Трение и износ.* — 1989. — **10**, № 6. — С. 973—980.
8. *Hills D. A., Nowell D., Sackfield A.* A survey of cracks in layers propelled by contact loading // *Mech. Coatings: Proc. 16th Leeds-Lyon Symp. Tribol., Lyon, France, 5—8 Sept., 1989.* — Amsterdam, 1990. — P. 203—208.
9. *El-Borgi Sami, Keer Leon, Ben Said Wissem.* An embedded crack in a functionally graded coating bonded to a homogeneous substrate under frictional Hertzian contact // *Wear.* — 2004. — **257**, N 7—8. — P. 760—776.
10. *Leroy J. M., Villechaise B.* Stress determination in elastic coatings and substrate under both normal and tangential loads // *Mech. Coatings: Proc. 16th Leeds-Lyon Symp. Tribol., Lyon, France, 5—8 Sept., 1989.* — Amsterdam, 1990. — P. 195—201.
11. *Stephens L. S., Liu Yan, Meletis E. I.* Finite element analysis of the initial yielding behavior of a hard coating/substrate system with functionally graded interface under indentation and friction // *Trans. ASME. J. Tribol.* — 2000. — **122**, N 2. — P. 381—387.
12. *Xinxiang P., Li Ya, Jinjun X.* Elastic-plastic deformation analysis of multi-layer surface coating under sliding contact // *Thin Solid Films.* — 1999. — **354**, N 1—2. — P. 154—161.
13. *Горячева И. Г., Горская Е. В.* Периодическая контактная задача для системы штампов и упругого слоя, сцепленного с упругим основанием // *Трение и износ.* — 1995. — **16**, № 4. — С. 642—652.
14. *Горячева И. Г., Горская Е. В.* Анализ напряженного состояния тел с покрытиями при множественном характере нагружения // *Там же.* — 1994. — **15**, № 3. — С. 349—357.

15. *Антонюк В. С., Сорока О. Б., Калініченко В. І.* Аналіз напружено-деформованого стану різального інструменту з покриттями // Вісник Національного технічного ун-ту України “Київський політехнічний інститут”: Серія приладобудування. — 2004. — Вип. 27. — С. 84—89.
16. *Пат. 68303 Україна, МПК С 23 С 14/32.* Спосіб нанесення зносостійких несучільних покриттів / В. А. Рутковський, В. С. Антонюк, В. М. Волкогон та ін. — Заявл. 03.12.03. Опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7.
17. *Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н.* Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. — 236 с.
18. *Mohrbacher H., Blanpain B., Celis J.-P. et al.* The influence of humidity on the fretting behaviour of PVD TiN coatings // *Wear*. — 1995. — **180**, N 1—2. — P. 43—52.
19. *Bertoncello R., Casagrande A., Casarin M. et al.* TiN, TiC and Ti(C, N) film characterization and its relationship to tribological behaviour // *Surface and Interface Analysis*. — 1992. — **18**, N 7. — P. 525—531.
20. *Urgan M., Eryilmaz O. L., Cakir A. F. et al.* Characterization of molybdenum nitride coatings produced by arc-PVD technique // *Surface and Coatings Technology*. — 1997. — **94—95**. — P. 501—506.
21. *Goller R., Torri P., Baker M. A. et al.* The deposition of low-friction TiN—MoS<sub>x</sub> hard coatings by a combined arc evaporation and magnetron sputter process // *Ibid.* — 1999. — **120—121**. — P. 453—457.

Национальный технический ун-т  
 “Киевский политехнический институт”  
 Ин-т проблем прочности  
 им. Г. С. Писаренко НАН Украины

Поступила 01.08.07