

Таким образом, проведенный анализ показывает, что оценки периода твидовых структур различного масштаба, образующихся при несвободном циклическом растяжении фольг монокристалла алюминия кубической ориентации, удовлетворительно согласуются с моделью нестабильности Гринфелда.

Нестабильность Гринфелда возникает в различных граничных условиях под действием определенных напряжений, что обеспечивает образование твидовых структур различного масштаба и их самоподобие. Образование твидовых структур обеспечивает дополнительный и альтернативный дислокационному скольжению канал снижения упругой энергии нагруженных кристаллов алюминия при напряжении выше предела текучести.

#### Список литературы

1. Gordienko Yu. G., Karuskevich M. V., Zasimchuk E. E. Forecasting the critical state of deformed crystal by the analysis of smart defect structure: fractal characteristics and percolation critical indexes // Proc. of Seventh Conference on Sensor and Their Application, Dublin, Ireland, 1995, p.387.
2. Gordienko Y. G., Zasimchuk E. E., Gontareva R. G. Unconventional deformation modes and surface roughness evolution in Al single crystals under restricted cyclic tension condition // Journal of Materials Science Letters, 2003, 22, p.241.
3. Кузнецов П.В., Петракова И.В., Гордиенко Ю.Г., Засимчук Е.Э., Карбовский В.А. Физ. Мезомех. (2007). -Т.10.- В.6.- С.33-42.
4. Гринфелд М.А. Неустойчивость границы раздела между негидростатически напряженным упругим телом и расплавом // ДАН СССР. (1986) Т. 290. С. 1358.
5. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Петракова И.В. О роли нестабильности Гринфелда при формировании твидовой структуры на поверхности кристаллов алюминия при циклическом растяжении // Физ. Мезомех. (2010) – Т.13. - № 1. – С.11-21/.
6. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Петракова И.В. Структурно-механические особенности пластической деформации фольг монокристалла  $\langle 001 \rangle \{100\}$  алюминия, наклеенных на плоские образцы алюминиевого сплава при несвободном циклическом растяжении // Физ. Мезомех. (2008) – Т.11. № 6. – С/ 103-114.

### ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОДЛОЖКИ НА СВОЙСТВА ТОПОКОМПОЗИТА

Константинов В.М., Комаров Ф.Ф., Ткаченко Г.А., Пилько В.В.,  
Ковальчук А.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*  
[v\\_m\\_Konst@mail.ru](mailto:v_m_Konst@mail.ru)

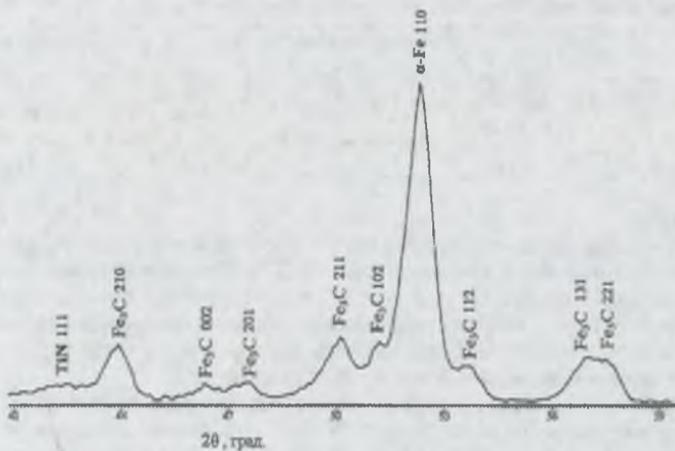
Актуальной задачей современного материаловедения является разработка новых упорочняющих покрытий защищающих поверхность стального изделия от коррозии, изнашивания, механических повреждений. Быстро развивающимися являются технологии тонких наноструктурированных многокомпонентных покрытий. Такие покрытия на поверхности металлических подложек гарантируют высокие нанотвердость, износостойкость и другие механические свойства. Однако система, состоящая из материала подложки и материала защитного поверхностного слоя – топокомпозит, имеет узкую область практического применения. Это обусловлено тем, что эксплуатационные свойства ограничены усилием и нагрузкой, которую может выдерживать подложка без продавливания покрытия. Подтверждением служат известные исследования [1], которые показали, что для тонких твердых покрытий проявляется эффект снижения несущей способности слоистой системы. Этот эффект заключается в снижении предельной нагрузки, действующей на топокомпо-

зит, для появления пластической деформации в материале подложки (продавливание покрытия) по отношению к нагрузке, прикладываемой к подложке без покрытия и приводящей к такой же пластической деформации в ней. В настоящее время доминирует точка зрения о необходимости учета не только традиционных механических свойств, но и эффективных характеристик топокомпозита – жесткости и пределов твердости, текучести и несущей способности, варианты расчета которых предложены автором [5].

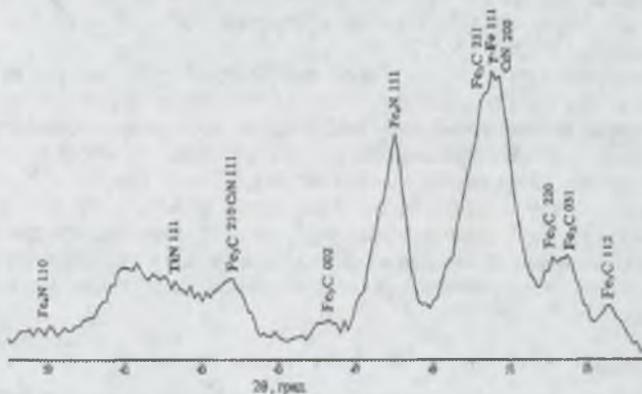
Выполненный анализ, свидетельствует о перспективности целенаправленного упрочнения стальной подложки по последующее нанесение высокотвердого вакуумного покрытия. Исследования влияния упрочнения поверхности металлической подложки проводили на образцах, не испытывающих полиморфных превращений и изменения растворимости элементов, следовательно, термически не упрочняемых. В качестве подложки было выбрано технически чистое железо (армо-железо), а также нержавеющая аустенитная сталь 12X18H9T. Исходная микроструктура подложки представляла собой равновесную, полученную полным отжигом (950 °С) с твердостью HB 120...150 на железе (структура феррит) и нержавеющей стали (структура аустенит). Упрочняющее модифицирование поверхности подложки заключалось в предварительной химико-термической обработке (нитроцементации). Выбор низкотемпературной нитроцементации обоснован высокой твердостью слоя 500...1000 HV 0.01, достигаемой без последующей закалки, низкой температурой (550...650 °С) процесса, широким распространением в промышленности. Покрытие нитрид титана было выбрано из-за его высокой технологичности, широкой распространенности, относительно низкой стоимости и высокого уровня триботехнических характеристик [3, 4].

Предварительная низкотемпературная нитроцементация проводилась по стандартной технологии [6]. Результаты химико-термической обработки: толщина слоя на армо-железе составила 400...450 мкм, на нержавеющей стали толщина слоя 500...550 мкм. Микротвердость образцов до нитроцементации: нержавеющая сталь – твердость  $152 \pm 10$  HV 0.01, армо-железо – твердость поверхности  $125 \pm 10$  HV 0.01. После диффузионного насыщения: нержавеющая сталь –  $840 \pm 10$  HV 0.01, армо-железо –  $400 \pm 10$  HV 0.01. Изменение механических свойств поверхности подложек обусловлено формированием азотсодержащих фаз:  $\alpha$  – фазы (армо-железе);  $\gamma$  –  $Fe_4N$ , CrN,  $\gamma$  – Fe аустенит (нержавеющая сталь), а также цементита. После нитроцементации на образцах армо-железа и нержавеющей стали с покрытием TiN регистрируются те же фазы, что и в образцах, подвергнутых нитроцементации, а также обнаруживается фаза нитрида TiN. Толщина диффузионного слоя повлияла на жесткость (продавливание) поверхности, что подтверждается изменением макротвердости по Бринеллю по стандартным условиям. Исходная твердость подложки выросла до HB 300...350. Магнетронное нанесение покрытия TiN на модифицированную и не модифицированную подложку осуществляли на толщину покрытия от 1 мкм до 5 мкм. Влияние модифицирования поверхности позволило изменить механические свойства топокомпозита: повысить микротвердость и износостойкость. Микротвердость системы выросла за счет нитроцементации, которая обеспечивает меньшее продавливание индентора через покрытие. На образцах армо-железо после насыщения и нанесения пленки TiN твердость увеличилась с  $400 \pm 10$  HV 0.01 до  $685 \pm 10$  HV 0.01. На нержавеющей стали с  $840 \pm 10$  HV 0.01 до  $1300 \pm 50$  HV 0.01

Трибологические свойства топокомпозита на различной металлической основе определяли в условиях сухого трения. Установка представляла собой механизм, состоящий из контртела в виде диска из нержавеющей стали 12X18H9T вращение которого осуществлялось синхронным двигателем типа РД-09 через редуктор со скоростью 0,33 оборота в секунду. Испытуемый образец, предварительно сбалансированный в равновесии с помощью подвижного противовеса, прижимался к диску усилием в 10 грамм.



a



б

Рис. 1. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoKa, съемка под углом  $6^\circ$ )  
 а – армко-железо с модифицированным слоем и TiN; б – нержавеющей стали 12X18H10T  
 с модифицированным слоем и TiN

Топокомпозит из армко-железа и покрытия нитрид титана на протяжении всех испытаний показывал стабильные результаты. На всех образцах в трех точках измерения получались одинаковые дорожки износа. Это может говорить о равномерности распределения механических свойств покрытия по подложке (твердость и коэффициент трения). Результат испытаний показал эффективность применения диффузионного модифицирования непосредственно перед нанесением покрытия (таблица 1).

Изнашивание топокомпозита из нержавеющей стали с модифицированной поверхностью оказалось неравномерным и не совсем прогнозируемым. Некоторые участки покрытия в трех точках показывали разные результаты износа (таблица 1). Это, скорей всего, обусловлено перепадом микротвердости по покрытию ( $1300 \pm 50$  HV 0.01).

Таблица 1. Результаты трибологических испытаний топокомпозитов

Образец	Fe	Fe + нитроцементация	Fe + TiN	Fe + азотирование + TiN
Дорожка износа, мкм	1073±15	1015±15	709±15	513±15
Образец	12X18H10T	12X18H10 нитроцементация	12X18H10T + TiN	12X18H10T + нитроцементация + TiN
Дорожка износа, мкм	1032±10	960±10	668±15	441±35

### Заключение

1. В исследованиях выполнен анализ влияния материала подложки на механические свойства топокомпозита с покрытием системы TiN. Установлено, что слоистый материал, состоящий из покрытия системы TiN и металлической основы, обладает твердостью  $256 \pm 10$  HV 0.01. Материал подложки и степень ее легирования не сказываются на твердости топокомпозита. Определяющим фактором повышения твердости многослойного материала является твердость самой подложки.
2. В результате предварительной нитроцементации подложки (армо-железо) твердость топокомпозита увеличилась до  $685 \pm 10$  HV 0.01. Повышение твердости обусловлено наличием диффузионного слоя ( $400 \pm 10$  HV 0.01), который исключает значительное продавливание индентора в глубину металла. Топокомползит на подложке из нержавеющей стали (марка 12X18H10T) с модифицированной поверхностью позволяет получать твердость  $1300 \pm 50$  HV 0.01.
3. Выполнены трибологические испытания топокомпозитов на различных металлических основах без модифицированной поверхности. Установлено, что материал подложки не влияет на износостойкость. Топокомползит состава армо-железо и покрытие, изнашивается с той же интенсивностью, что и система, состоящая из нержавеющей стали и покрытия. Длина дорожек износа составила  $670 \pm 15$  (железо) и  $709 \pm 15$  мкм (аустенитная сталь). Слоистая система с максимально твердой и жесткой модифицированной поверхностью (исключающим продавливание покрытия) изнашивается менее интенсивно. Топокомползит на основе нержавеющей стали с нитроцементованным слоем показал наибольшую износостойкость, что подтверждает длина дорожки износа  $441 \pm 35$  мкм.

### Список литературы

1. Воронин Н.А. Топокомползиты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Ч.1. Трение и износ, 1999. Т.20 №3. С. 313-320. Ч.2. Трение и износ, 1999. Т.20. №5. С.533-544.
2. Diao D. Tribo-design of coating/substrate system // Proceeding of the international symposium of high performance of tribosystem, May 28-29. 1999. KETRI, Korea, P. 36-41.
3. Ходасевич В.В., Солодухин И.А. Роль предварительного облучения и нагрева подложки в модификации переходного слоя и механических свойств покрытий TiN. // 3-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». Октябрь 6-8. 1999. БГУ, Минск. С.109-111.
4. Polok M. Comparison of the PVD coatings deposited onto plasma nitrated steel. // Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. 2010.V.42. №2.P.172-179.
5. Shengli Ma The composite of nitrated steel of H13 and TiN coatings by plasma duplex treatment and the effect of pre-nitriding / Shengli Ma, Yanhuai Li // Surface and Coatings Technology, 2001 № 137. С. 116-121.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : Справочник / под ред. Л. С. Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.