

$$\varepsilon_{np}(0) \approx n + \frac{1}{2}q - \frac{1}{2}q \sqrt{(1-E)^2 + 4f^2 \left[ n + \frac{1}{2}(1+q) \right]}, \quad (14)$$

где  $q \equiv p(-1)^n$ .

Возьмем конкретный пример:  $f \ll 1$ ,  $\varphi_{\uparrow}(0) = 1$ ,  $\varphi_{\downarrow}(0) = 0$ . Тогда, подставляя (12–14) в (11), получаем:

$$\varphi_{\uparrow}(t) = e^{2f(\alpha+\alpha^*)} e^{-i(n_0 - \frac{1}{2})t} \cos \left[ \left( \sqrt{\frac{(1-E)^2}{4} + f^2 n_0} \right) t \right], \quad (15)$$

$$\varphi_{\downarrow}(t) = -ie^{2f(\alpha+\alpha^*)} e^{-i(n_0 - \frac{1}{2})t} \sin \left[ \left( \sqrt{\frac{(1-E)^2}{4} + f^2 n_0} \right) t \right], \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) и представляют собой точный квазиклассический предел эволюционной задачи в модели Джайнса-Каммингса. Как и следовало ожидать, амплитуды вероятности осциллируют с частотой Раби  $\Omega$ , равной

$$\Omega = \sqrt{\frac{(1-E)^2}{4} + f^2 n_0}, \quad (17)$$

### Литература

1. Альперин М. М., Клубис Я. Д., Хижняк А. И. Введение в физику двухуровневых систем. // Киев: Наук. думка, 1987. 224с.
2. Feranchuk I. D., Komarov L. I. The operator method of the approximate solution of the Schrödinger equation. // Phys. Lett., 88A, 211–214 (1982).
3. Feranchuk I. D., Komarov L. I., Ulyanenko A. P. // J. Phys. A: Math. Gen., 29, 4035–4047 (1996).

## СТРУКТУРНА-ФАЗАВЫЯ ЗМЯНЕННІ І МЕХАНІЧНЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ СІСТЭМЫ НІКЕЛЬ-ЦЫРКОНІЙ, АПРАЦАВАНАЙ КАМПРЭСІЙНЫМІ ПЛАЗМЕННЫМІ ПАТОКАМІ

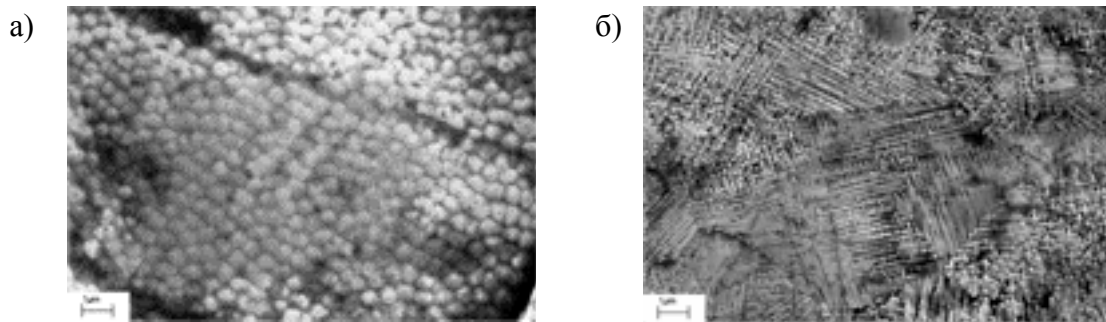
Ю. А. Петухоў

Актуальнай праблемай сучаснай фізікі цвёрдага цела і матэрыялазнаўства з'яўляецца вывучэнне ўзаемадзеяння патокаў часцінак з паверхняй матэрыялаў. Сярод шырокага класа часцінак, што выкарыстоўваюцца ў даследаваннях, асаблівы інтарэс выклікаюць іоны і электроны, якія знаходзяцца ў стане плазмы. Правядзенне апрацоўкі рэчваў патокамі

часцінак патрабуе меншых энергетычных і часавых рэсурсаў, чым традыцыйная тэрмічная або хімічная апрацоўка, і з'яўляецца больш экалагічна бяспечным. Найбольш істотным фактарам, які абумоўлівае актыўнае вывучэнне дадзенага пытання, ёсць змяненне ўласцівасцяў паверхні рэчыва ў выніку ўздзеяння патокаў часцінак: крышталічнай структуры і фазавага складу, мікраструктуры, механічных характарыстык і г. д. [1, 2]. З прычыны таго, што пры пранікненні іонаў і электронаў у рэчыва яны прыцягваюць шматлікія сутыкненні з атамамі і малекуламі матэрыяла, змяненне фазавага стану і ўласцівасцяў адбываецца пераважна ў паверхневым слаі, таўшчыня якога складае дзесяткі мікраметраў. Адным з напрамкаў у галіне даследванняў з'яўляецца вывучэнне ўздзеяння плазменных патокаў на сістэму «пакрыцце-падкладка» [3].

У якасці аб'екта даследвання была выбараная сістэма «нікелевая падкладка-цырконевае пакрыцце». Апошняя было нанесена метадам вакуумна-дугавага асаджэння пры патэнцыяле падкладкі -120 В, току гарэння дугі 100 А. Час нанясення пакрыцця складаў 10 хвілін, а яго таўшчыня ~ 2 мкм. Пrowadзілася апрацоўка кампрэсійнымі патокамі азотнай і вадароднай плазмы, атрыманымі ў магнітаплазменным кампрэсары кампактнай геаметрыі [4]. Працягласць плазменных імпульсаў складала ~100 мкс, шчыльнасць паглынутай энергіі –  $10 \div 15$  Дж/см<sup>2</sup>. Для даследвання рэльефу паверхні, а таксама яе структуры і элементнага складу выкарыстоўваўся растравы электронны мікраскоп LEO1455VP фірмы «Karl Zeiss» з энергадысперсійным рэнтгенаўскім мікрааналізатарам Rontec. Для даследвання фазавага складу метадам рэнтгенаструктурнага аналізу быў выкарыстаны рэнтгенаўскі дыфрактометр ДРОН-3. Вымярэнне мікрацвёрдасці праводзілася метадам Вікерса з дапамогай цвёрдамера ПМТ-3, а трыбалагічныя выпрабаванні – на трыбометры ТАУ-1М.

Даследванні метадам растравай электроннай мікраскапіяй выявілі змяненне характара паверхні апрацаваных рэчываў. Паверхні рэчываў маюць выгляд крышталізаванай вадкасці, што дазваляе зрабіць высновы наконт механізму ўздзеяння кампрэсійных плазменных патокаў на матэрыялы. Па выглядзе мікраструктуры паверхні нікеля і сістэмы нікель-цырконій можна меркаваць, што пры ўзаемадзеянні плазмы з матэрыяламі адбываецца плаўленне і хуткая крышталізацыя. Устаноўлена, што на паверхні апрацаваных матэрыялаў утвараецца ячэйстая і дэнтрытная структуры (рыс. 1). Механізм утварэння дадзеных утварэнняў апісаны ў мадэлі канцэнтрацыйнага ахалоджвання [5] і заключаецца ў тым, што пры хуткім памяншэнні тэмпературы пасля ўздзеяння



Рыс. 1. Мікрафатаграфіі ячэйстай структуры:  
 а) на паверхні нікеля, б) на паверхні сістэмы нікель-цырконій

плазменнага імпульсу на фронце крышталізацыі ўзнікаюць неўстойліва-сці, у выніку развіцця якіх фармуюцца ячэйкі і дэндрыты. Характэрны памер ячэек складае 0,4–0,7 мкм. Утварэнне дэндрытаў звязана з памяншэннем хуткасці крышталізацыі пры дадаванні цырконія да нікеля.

Вынікі праведзенага рэнтгенаструктурнага аналізу паказалі, што пры апрацоўцы чыстага нікеля фазавыя пераўтварэнні не назіраюцца, але ж мае месца частковая пераарыентацыя атамных плоскасцяў да накірунка (200). У сістэме нікель-цырконій у выніку вадкафазнага перамешвання нікелевай падкладкі і цырконевага пакрыцця, выкліканага ўздзеяннем кампрэсійнымі патокамі як вадароднай, так і азотнай плазмы, адбываецца ўтварэнне інтэрметаліду  $\text{Ni}_3\text{Zr}$ , у якім удзельнічае амаль што ўвесь цырконій. Таксама ў выніку апрацоўцы азотнай плазмай частка цырконія ўзаемадзейнічае з рэчывам плазмы, утвараючы нітрыд  $\text{ZrN}$ . Магчымасць утварэння дадзеных злучэнняў падцверджаецца дыяграмамі стану [6].

Згодна з вынікамі вымярэння мікрацвёрдасці апрацоўка кампрэсійнай плазмай выклікае яе павелічэнне да 2 разоў для чыстага нікеля і ў 3–3,5 разы для сістэмы нікель-цырконій. У дадзеным выпадку можна вылучыць два асноўных фактары, якія ўплываюць на велічыню мікрацвёрдасці:

- фармаванне новых фаз;
- умацаванне, звязанае з эфектамі загартоўкі (павелічэнне канцэнтрацыі дыслакацый, памяншэнне памераў зерняў).

Пры апрацоўцы чыстага нікеля мікрацвёрдасць павялічваецца толькі за кошт другога эфекта (фазавы склад не змяняецца, што падцверджаецца вынікамі рэнтгенаструктурнага аналізу), а пры апрацоўцы сістэмы нікель-цырконій уплываюць абодва фактары. Гэтым тлумачыцца розная ступень яе павелічэння.

Вынікі трыбалагічных выпрабаванняў паказалі, што плазменная апрацоўка нікеля без пакрыцця амаль не ўплывае на значэнне каэфіцыента трэння, але легіраванне цырконіем пад уздзеяннем кампрэсійных патокаў

плазмы выклікае памяншэнне каэфіцыента трэння ў 1,7 разоў пры апрацоўцы вадароднай плазмай і ў 5 разоў – пры апрацоўцы азотнай плазмай у параўнанні з неапрацавым нікелем.

Вынікі вымярэння каэфіцыента трэння падцверджваюцца растрава-электроннамікраскапічнымі даследваннямі трэкаў зносу на паверхні апрацаваных матэрыялаў. На гатунках нікеля і неапрацавай сістэмы нікель-цырконій яны бесперапынныя, а пасля апрацоўкі апошняй набываюць выгляд перапынлых слаба заўважных слядаў уздоўж траекторыі руху індэнтара трыбометра, што дазваляе меркаваць пра меншы знос гатункаў з меншым каэфіцыентам трэння. Паляпшэнне трыбалагічных характарыстык абумоўлена, з аднаго боку, павелічэннем мікрацвёрдасці, а з другога боку – змяненнем паверхневай марфалогіі, якое прыводзіць да памяншэння плошчы кантакта індэнтара з паверхняй.

Даследванне трэкаў метадам рэнтгенаўскага мікрааналізу выявіла наяўнасць акіслення ў месцах трыбакантакту зыходнага і апрацаванага нікеля; у апрацаванай сістэме нікель-цырконій павелічэння канцэнтрацыі кіслароду не назіраецца, што звязана з фармаваннем на паверхні фаз інтэрметаліда і нітрыда цырконія.

Атрыманыя вынікі дазваляюць меркаваць пра ўласцівасці паверхневага слою і дастасавання апрацаваных матэрыялаў, якія спалучаюць устойлівасць да хімічных рэакцый і палепшаныя механічныя параметры, пры вырабе інструментаў, якія працуюць у агрэсіўных хімічных асяроддзях.

### Літаратура

1. Langner J., Piekoszewski J., Werner Z., et. al. Surface modification of constructional steels by irradiation with high intensity pulsed nitrogen plasma beams // *Surface&Coatings Technology*. 2000. №128–129. P. 105–111.
2. Апарина Н. П., Боровицкая И. В., Васильев В. И. и др. Воздействие импульсной водородной плазмы с поверхностью ванадия и его сплавов // *Металлы*. 2000. №2. С. 112–114.
3. Tereshin V., Bandura A., Byrka O., Chebotarev V., et. al. Coating deposition and surface modification under combined plasma processing // *Vacuum*. 2004. №73. P. 555–560.
4. Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А. И. Морозова. Мн., 1974.
5. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. М. Поута, Г. Фоти, Д. К. Джекобсона. М., 1987.
6. Диаграммы состояния двойных металлических систем: В 3т. / Машиностроение. М., 1997.