

В.Ч.Лауринас, О.Н.Завацкая, В.М.Юров, С.А.Гученко

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: exciton@list.ru)

Автоволновые процессы при формировании ионно-плазменных покрытий

В статье обсуждены результаты исследования микротвердости ионно-плазменных покрытий. Для получения покрытий использовались одно- и многокомпонентные плазменные потоки. Осаждение покрытий производилось в атмосфере аргона и азота. Экспериментальные данные показали, что микротвердость покрытий квазипериодически изменяется по поверхности образца. Предложена модель формирования периодической структуры покрытия, основанная на возникновении автоколебательных движений при формировании покрытия за счет концентрационных градиентов компонент осаждаемых потоков.

Ключевые слова: плазма, покрытие, микротвердость, микроструктура, автоволны, давление, неравновесная конденсированная система, адекватные модели.

Введение

Первые режущие пластины с покрытием появились на зарубежном рынке в 1968 г., когда шведской фирмой «Сандвик Коромант» был разработан и внедрен в производство метод осаждения карбида титана на твердосплавный инструмент. В 1971 г. фирмой Teledyne Firth Sterlig (США) были получены покрытия из нитрида титана. В Московском институте стали и сплавов в 1971 г. был разработан метод осаждения покрытия из карбида ниобия. В последующие годы исследователями многих стран (США, Франции, Японии, Великобритании, ФРГ и др.) разрабатывались технологии нанесения различных покрытий различного назначения. Появилось большое число работ, посвященных различным аспектам технологии нанесения покрытий [1–11].

Оказалось, что на свойства покрытий влияет большое количество факторов: состав распыляемых катодов и их физико-химические свойства; свойства подложки, на которую происходит осаждение материала; технологические факторы — ток дуги, давление реакционного газа, температура подложки, величина опорного напряжения и т.д. [1, 12–15].

Разнообразие влияющих факторов породило большое количество технологических приемов формирования покрытий [16–19]. В последние годы наибольшую популярность получили методы осаждения многофазных высокоэнтропийных материалов [20]. Однако использование многоэлементных или многофазных материалов для получения функциональных покрытий порождает многопараметрическую задачу — изменение их состава путем перебора требует больших материальных и временных затрат. В этом случае многие исследователи связывают большие надежды с компьютерным моделированием свойств композиционных материалов и покрытий [21, 22].

Следует отметить, что существует и другой круг исследователей, которые считают, что необходимо возврат к феноменологическому подходу на более высоком уровне обеспечения методами исследования конденсированных систем [23]. При этом идет ссылка на высказывание Нобелевского лауреата И.Пригожина: «...формульно-расчетный подход не может привести к познанию Природы. В настоящее время мы видим, что основную роль стали играть описательные науки» [24].

Автором [23] предлагается релаксационный принцип управления свойствами сложных физико-химических систем, который можно сформулировать таким образом: если времена релаксации системы много больше длительности воздействия ($t_{\text{релаксации}} \gg t_{\text{воздействия}}$), то можно управлять свойствами системы (выход химических форм и фаз, устойчивость), используя сведения о механизмах релаксации в неравновесных системах (для конденсированного вещества на физико-химической стадии релаксационных процессов, в том числе и в процессе эксплуатации).

Релаксационные эффекты в самоорганизующейся неравновесной конденсированной системе можно использовать для управления выходом химических форм и фаз, а следовательно, и свойствами получающихся материалов. Но для этого необходимы точные сведения (или адекватные модели) о механизмах релаксационных процессов в конденсированных системах на физико-химической стадии получения материалов. Их можно получить только при использовании неразрушающих методов фазово-элементного исследования (лучше в режиме *in situ* — реального времени) [25].

Частично соглашаясь с авторами [25], необходимо отметить, что любая сложная конденсированная система имеет множество времен релаксации: ядерная, электронная, фононная подсистемы и т.д., каждая из которых имеет свой набор времен релаксации от пико- до микросекунд и более. Проследить за эволюцией системы от момента ее перехода в неравновесное состояние (возбуждение) до ее возврата в равновесное состояние в режиме реального времени — задача технически очень трудная и во многих случаях нерешенная.

Для ионно-плазменных покрытий процесс их формирования в режиме реального времени пока не наблюдается в силу специфики технологического процесса. Поэтому основная информация получается при варьировании как состава осаждаемого материала, так и технологических параметров осаждения. В связи с этим в данном случае совершенствуются методики исследования уже синтезированных покрытий и модели их формирования (оптическая, электронная, атомно-силовая микроскопия и многие другие экспериментальные методы).

В настоящей работе мы обсуждаем эффект самоорганизации ионно-плазменных покрытий при их формировании на основе модели автоволновых процессов (АВП). Основой для привлечения этой модели послужили полученные нами экспериментальные результаты по исследованию микротвердости ионно-плазменных покрытий.

Объекты и методика эксперимента

Для нанесения покрытий использовались титановые катоды марки ВТ-1-00 по ГОСТу 1908 и катоды из стали марки 12Х18Н10Т. С помощью этих катодов наносились покрытия на установке ННВ-6.БИ1 на стальную подложку в газовой среде аргона и азота в течение 40 мин при токе дуги $I_u = 80$ А, опорном напряжении $U_{on} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст.

Микроструктура покрытий исследовалась на металлографическом микроскопе EPIQUANT. Микротвердость покрытия измерялась на микротвердомере HVS-1000 А по методу Виккерса вдоль, поперек и по диагонали образцов. Необходимо отметить, что метод измерения микротвердости применяется до настоящего времени для оценки физико-механических свойств металлов, сплавов, металлических покрытий и других материалов. Однако для решения задач физико-химического анализа он перестал использоваться (уступив современным методам: рентгеновская, оже-спектроскопия и т.д.), хотя методология и инструментальное исполнение этого метода осуществлены еще в 40-х годах прошлого века и обобщены в монографии [26].

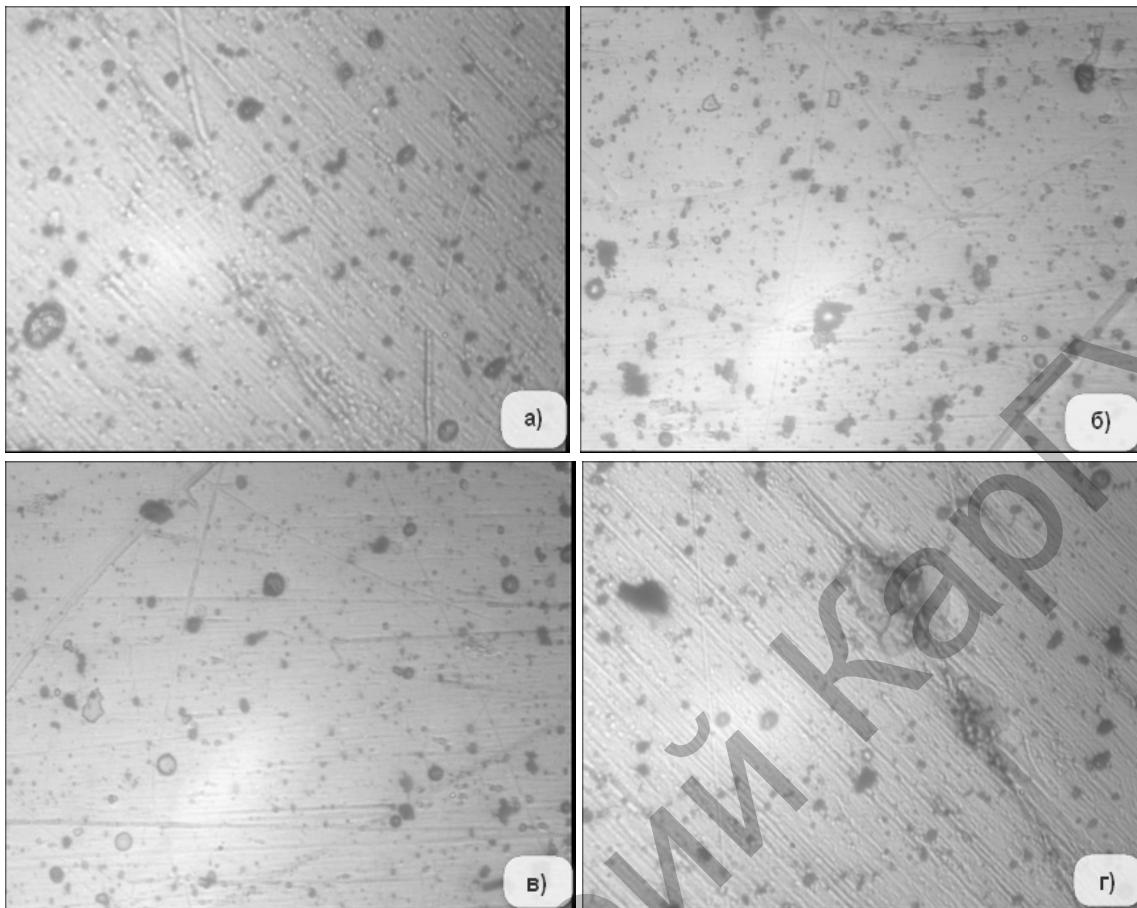
Ниже мы покажем, что использование метода измерения микротвердости может привести к неожиданным результатам.

Результаты эксперимента

На пять модельных образцов из нержавеющей стали было нанесено ионно-плазменное покрытие нитрида титана в течение 40 мин. Микроструктура покрытий показана на рисунке 1. Измерения проводились при нагрузке 0,1 кг, что соответствует 0,989 Н, и времени выдержки нагрузки 15 сек. Следует заметить, что среднее арифметическое значение микротвердости покрытий образцов составляет 483,2 НВ, однако в середине образца № 3 обнаружено крупное пятно, вокруг которого микротвердость резко увеличилась до 1388,4 НВ, внутри самого же пятна она была чуть меньше — 922,2 НВ (рис. 2). Появление такого пятна не соответствует образованию капельной фазы, микротвердость которой должна быть значительно меньше. Мы связываем наблюдаемый эффект с образованием сверхтвердой нанокристаллической фазы.

На рисунке 3 показано изменение микротвердости нитрид титанового покрытия поперек и по диагонали образца. Как видно из рисунка 3, изменение микротвердости носит «квазипериодический» характер. В литературе мы не нашли подобного рода исследований.

Следующим этапом наших исследований было нанесение многослойных покрытий. На четыре образца из нержавеющей стали послойно через каждые 10 мин в течение 40 мин было нанесено ионно-плазменное покрытие, состоящее из стали марки 12Х18Н10Т и титана в газовой среде аргона при токе испарения $I_u = 80$ А, опорном напряжении $U_{on} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-5}$ мм рт. ст. Микроструктура полученных покрытий показана на рисунке 4.



а, г — в середине образца; б, в — по краям образца

Рисунок 1. Микроструктура нитрид титанового покрытия образца

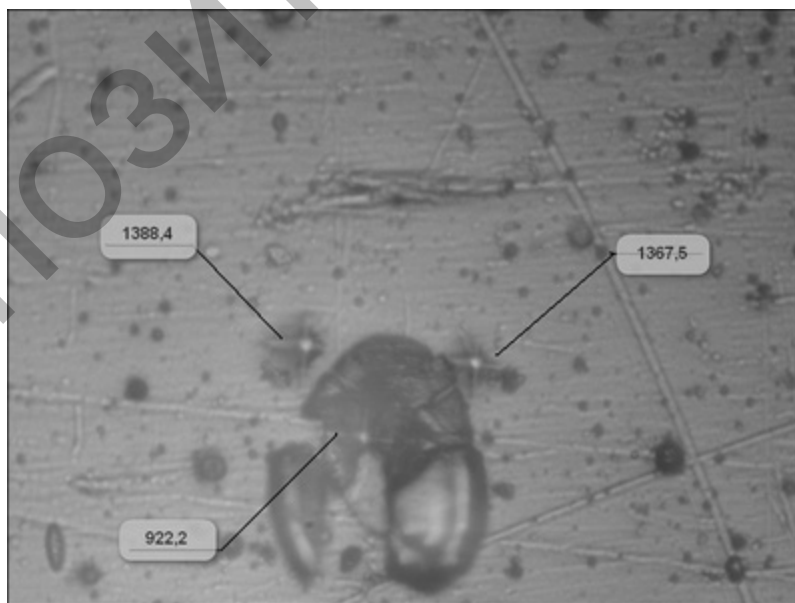


Рисунок 2. Микротвердость вокруг пятна и самого пятна

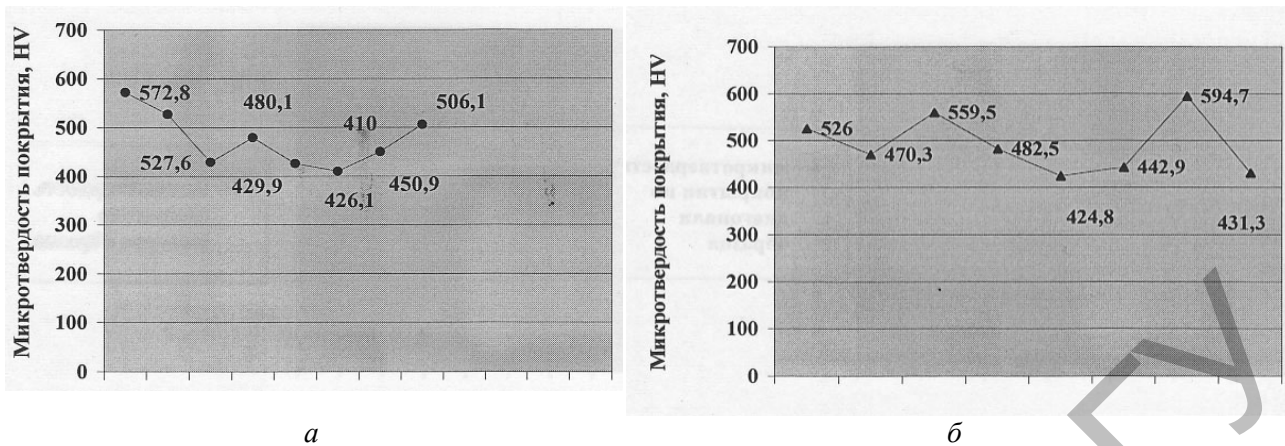


Рисунок 3. Микротвердость нитрид титанового покрытия поперек (а) и по диагонали образца (б)

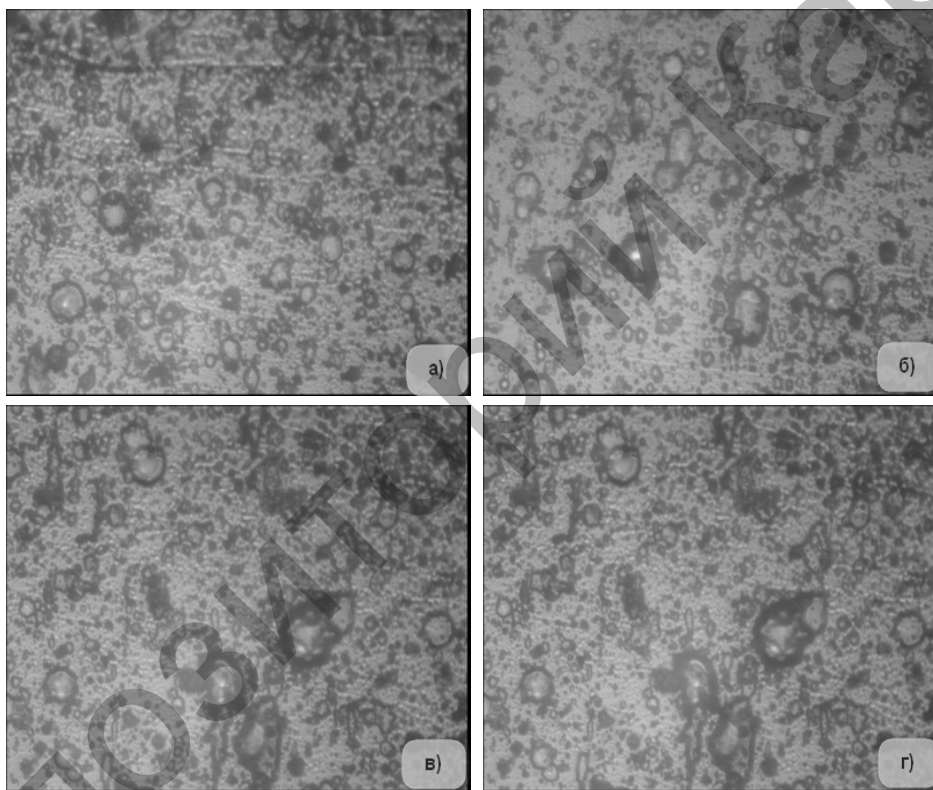


Рисунок 4. Микроструктура многослойного покрытия 12X18N10T + Ti (10/10 мин) в газовой среде аргона на четырех образцах

В отличие от предыдущего случая, здесь наблюдается более крупнозернистая структура покрытия. Среднее значение микротвердости покрытия образцов составляет 526,6 HV, что на 43 HV превышает предыдущий случай. В практическом плане это означает, что для повышения износостойкости деталей лучше использовать многослойные покрытия.

На рисунке 5 показано изменение микротвердости покрытия поперек и по диагонали образца. В этом случае также наблюдается «квазипериодическое» изменение микротвердости.

Нами проведен также эксперимент при одновременном распылении катодов титана и 12X18N10T. На пять образцов из нержавеющей стали было нанесено ионно-плазменное покрытие, состоящее из стали марки 12X18N10T и титана в газовой среде аргона, в течение 40 мин при токе испарения титана $I_{ti} = 80$ А и токе испарения стального катода $I_{st} = 60$ А, опорном напряжении $U_{on} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 1 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. Полученная при этом микроструктура покрытий показана на рисунке 6.

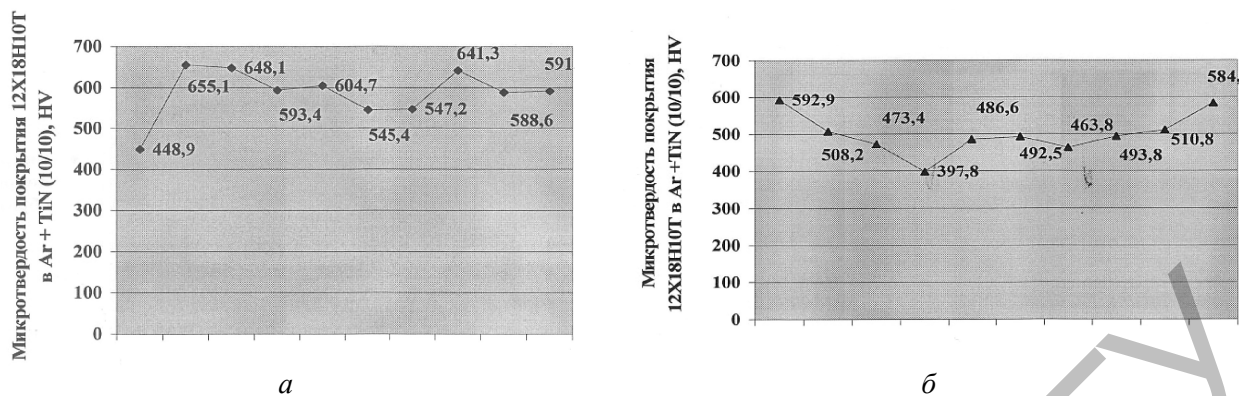


Рисунок 5. Микротвердость многослойного покрытия 12X18H10T + Ti в газовой среде аргона поперек (а) и по диагонали (б) образца

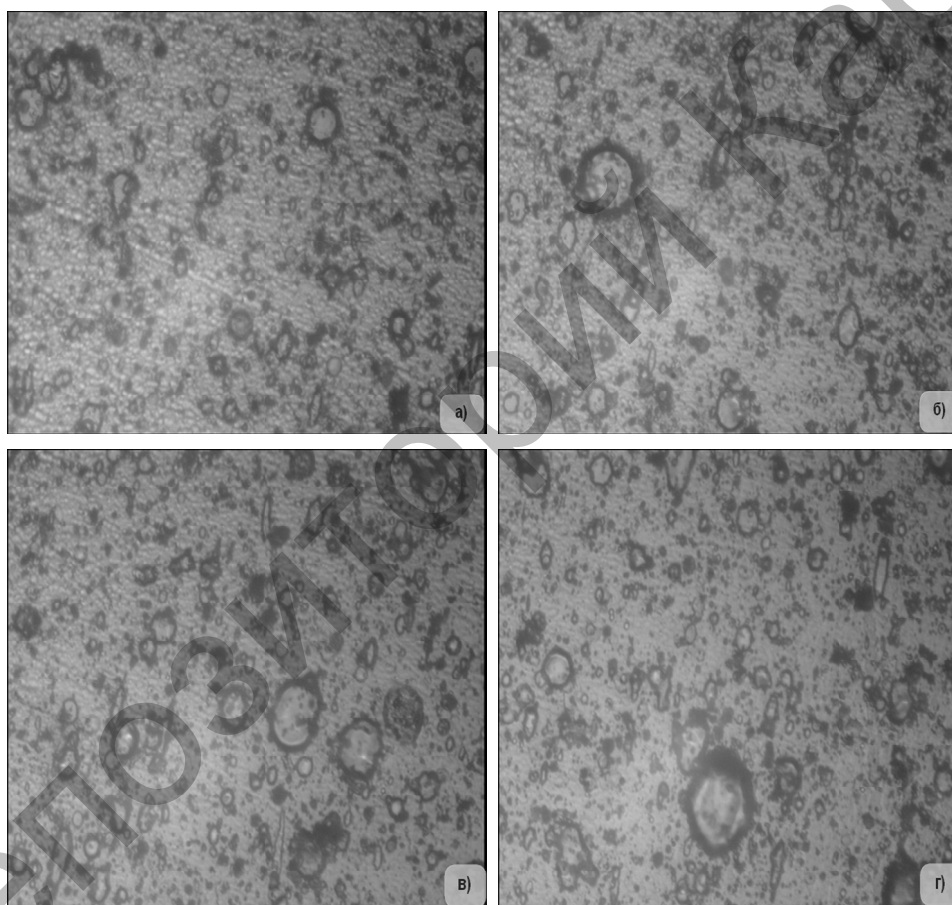
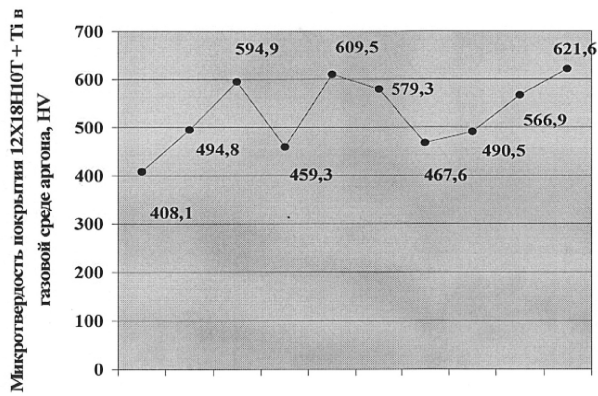


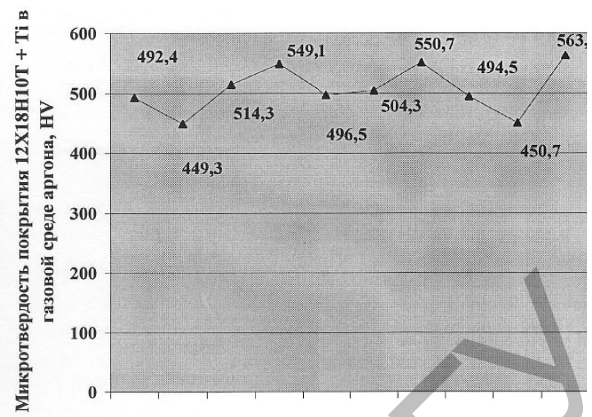
Рисунок 6. Микроструктура покрытия 12X18H10T + Ti в газовой среде аргона на четырех образцах

В этом случае микроструктура покрытия имеет большое сходство с многослойным покрытием, но среднее значение микротвердости составляет 473,3 HV, что меньше, чем в предыдущем случае, и практически совпадает с первым случаем. На рисунке 7 показано изменение микротвердости покрытия поперек и по диагонали образца. В этом случае также наблюдается «квазипериодическое» изменение микротвердости.

Нами проведен также эксперимент при одновременном распылении катодов титана и 12X18H10T в среде азота. Микроструктура покрытий показана на рисунке 8.

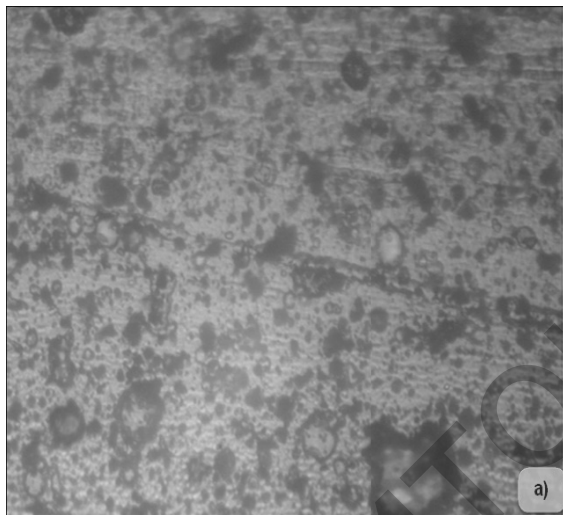


a

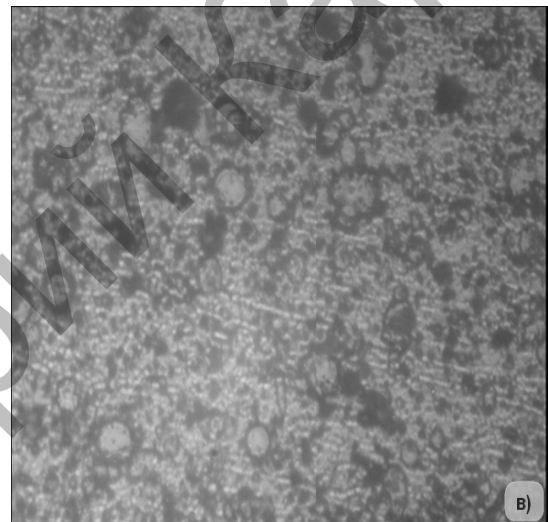


б

Рисунок 7. Микротвердость покрытия 12X18N10T + Ti в газовой среде аргона поперек (*a*) и по диагонали (*б*) образца

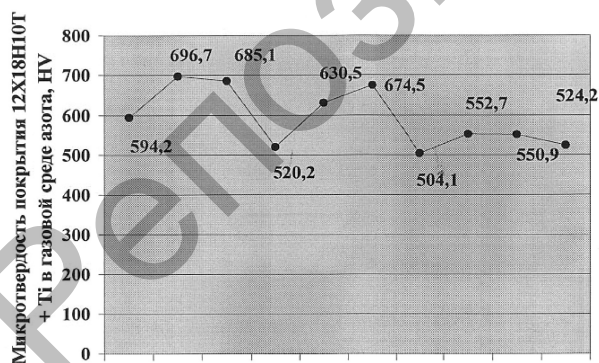


a)

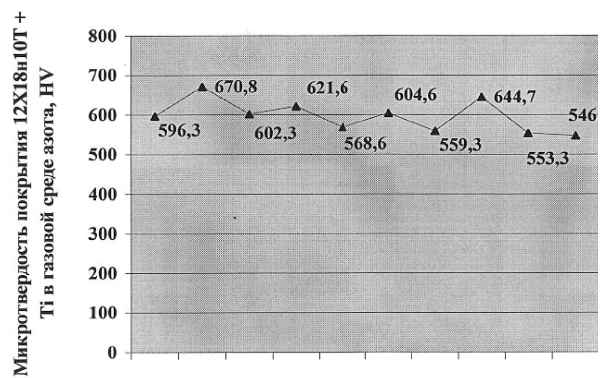


б)

Рисунок 8. Микроструктура покрытия 12X18N10T + Ti в газовой среде азота на двух образцах



a



б

Рисунок 9. Микротвердость покрытия 12X18N10T + Ti в газовой среде азота поперек (*a*) и по диагонали (*б*) образца

В этом случае микроструктура покрытия также имеет сходство с предыдущими структурами. Среднее значение микротвердости покрытия образцов составляет 522,7 HV, что практически совпадает со значением микротвердости многослойного покрытия. Таким образом, износостойкость детали

можно повысить как при использовании многослойных покрытий, так и при одновременном распылении различных катодов. В технологическом плане одновременное распыление различных катодов осуществлять легче, чем нанесение многослойных покрытий.

На рисунке 9 показано изменение микротвердости покрытия поперек и по диагонали образца. В этом случае также наблюдается «квазипериодическое» изменение микротвердости.

Обсуждение результатов эксперимента

Из приведенных выше экспериментальных исследований видно, что формирование ионно-плазменного покрытия в пространственных координатах следует «квазипериодическому» закону, т.е. отвечает некоторому автоволновому процессу (АВП). Под АВП принято понимать самоподдерживающийся в активной нелинейной среде волновой процесс (включая стационарные структуры), сохраняющий свои характеристики постоянными за счет распределенного в среде источника энергии [27]. Эти характеристики — период, длина волны (или импульса), скорость распространения, амплитуда и форма — в установившемся режиме зависят только от локальных свойств среды, не зависят от начальных и достаточно далеки от границ среды и от краевых условий. При этом в пространстве предполагается связь посредством переноса диффузионного типа.

Сами термины «автоволновой процесс», «автоволна» (АВ) были предложены Р.В.Хохловым, хотя теория автоволн была развита математиками — работы Р.Фишера (1937), А.Н.Колмогорова, Г.И.Петровского и И.С.Пискунова (1937), Н.Винера и А.Розенблюта (1946), А.Тьюринга (1952) — задолго до их экспериментального открытия [27]. В последующем теория АВП стала неотъемлемой частью теории самоорганизации, или синергетики [28–30].

Большой класс АВ-сред условно можно описать с помощью следующей схемы. В открытую распределенную систему извне поступает энергия или вещество, богатое энергией. Эти потоки управляются локальными свойствами регулирующей поверхности или, точнее, пограничного слоя малой толщины. В свою очередь локальные свойства поверхности зависят как от волн температуры, потенциала концентрации, распространяющихся вдоль тонкого пограничного слоя, так и от процессов, происходящих в подложке. К таким системам относятся волны окисления аммиака и углерода на платине и ряд других [27].

Во втором классе АВ-сред поверхностные эффекты не столь выражены. Локальная положительная обратная связь обеспечивает наличие N-образной характеристики среды с падающим участком «отрицательного» сопротивления в любом элементарном объеме. К таким средам и пространственно-временным структурам в них относятся автоколебательные реакции Белоусова-Жаботинского, домены в электронно-дырочной плазме полупроводников и ряд других [28].

К третьему классу можно отнести сложные многофазные среды, в которых неравновесность и АВП поддерживаются за счет энергии лазерного излучения, энергии ионной плазмы, как в наших экспериментах, термохимических реакций и других источников. Подобные явления определяются не только диффузией и теплопередачей, но и гидродинамическими потоками, в частности конвекцией, испарением, кипением, поверхностным натяжением. Образование структур с участием поверхностных явлений рассматривалось в монографии [31] и нами в работе [32].

Из приведенных выше рассуждений следует, что рассматриваемые явления, наблюдаемые в наших экспериментах, относятся к третьему классу, хотя при определенных упрощениях их можно отнести и к первому.

Основой моделей, описывающих процессы в активной распределенной кинетической системе, служат уравнения материального баланса:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) - \text{div } I_i. \quad (1)$$

Здесь x_i — взаимодействующие между собой компоненты; I_i — поток i -го компонента:

$$I_i = Vx_i - \sum_{k=1}^n D_{ik} \text{grad } x_k, \quad (2)$$

где V — направленная скорость движения компонента, а D_{ik} — матрица коэффициентов диффузии.

В простейшем случае одномерного пространства уравнения (1)–(2) запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\sum_{k=1}^n D_{ik}(x_1, x_2, \dots, x_n) \frac{\partial x_i}{\partial r} \right). \quad (3)$$

Краевые условия систем (1)–(3) определяются конкретными задачами, но наиболее часто используются условия «непроницаемости» границ конечного отрезка $[0, L]$:

$$\left. \frac{\partial x_i}{\partial t} \right|_{r=0} = 0. \quad (4)$$

При этих условиях система максимально автономна и характер АВП менее всего подвержен влиянию границ.

Если перемешивание внутри «объема» $[0, L]$ происходит достаточно быстро, то в любой его части процессы синхронны и система описывается так называемыми «точечными» уравнениями [27]:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (5)$$

Формально от системы (3) к (5) можно перейти при $D_{ik} \rightarrow \infty$. Физически это означает, что переход к (5) отвечает нулевому приближению по отношению характерных времен диффузии и химических процессов.

В наших экспериментах приближение (5) не может быть применено. Это отчетливо видно из рисунков 3, 5, 7, 9, где длина волны составляет порядка 10^{-4} м, т.е. скорость массопереноса равна $\sim 10^{-4}$ м/с. Поскольку скорость массопереноса $V \approx \sqrt{D/t}$, то для коэффициента диффузии получаем оценку $D \sim 10^{-8}$ м²/с. Это отвечает режиму малой диффузии.

В монографии [33] предпринимается попытка создания единой теории диссипативных структур Тьюринга-Пригожина для систем параболических и гиперболических уравнений с малой диффузией. Для этого развиваются специальные асимптотические методы исследования проблем существования и устойчивости высококомодовых стационарных режимов в сингулярно возмущенных системах, позволяющие получить весьма тонкие утверждения о неограниченном росте количества устойчивых диссипативных структур (как стационарных, так и периодических по времени) при уменьшении коэффициентов диффузии и при фиксированных прочих параметрах.

В качестве модельной системы в [33] берется уравнение типа (3)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = vD \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + F(u). \quad (6)$$

Здесь параметр $v > 0$ отвечает за пропорциональное изменение коэффициентов диффузии. Основное предположение о краевой задаче (6) заключается в том, что $u = 0$ — единственное ее пространственно однородное состояние равновесия, глобально экспоненциально устойчивое в рамках точечной модели (5). Однако такая модель содержит внутреннее противоречие, поскольку точечная модель (5) применима при $D_{ik} \rightarrow \infty$. Поэтому мы не будем останавливаться на модели (6). Отметим лишь, что теория диссипативных структур еще далека от своего завершения.

Нелинейные свойства среды, когда возникают условия для образования диссипативных структур, можно получить не только при предположении о нелинейности функции F в задачах (1)–(3) и (6), но и при наложении других условий на отрезке $[0, L]$, например, задавая произвольный закон движения границы L . В этом случае мы приходим к нелинейным задачам Стефана, которые также допускают решения в виде АВП.

Подобный подход осуществлен нами в работе [34]. Для плотности потока атомов или ионов, формирующих покрытие, мы получили следующее уравнение:

$$\rho(r, t) = \text{const} \cdot J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{1}{\beta(t)}, \quad (7)$$

где J_0 — функция Бесселя нулевого порядка; r — текущая координата; R — геометрический размер подложки; $\beta(t)$ — скорость движения раздела фаз.

Уравнение (7) неплохо описывает полученные нами экспериментальные данные при автоматическом законе движения границы L .

Заключение

Таким образом, в настоящей работе экспериментально обнаружено существование автоволновых процессов при формировании ионно-плазменных покрытий, приводящих к образованию диссипативных структур. Детальный теоретический анализ АВП в нашей системе вызывает пока определенные трудности, хотя общая картина процесса вытекает из всех описанных в работе моделей. Бу-

дущая модель должна не только предсказывать существование диссипативных структур, но и содержать параметры процесса с тем, чтобы управлять свойствами получаемых покрытий.

Работа выполнена по программе МОН РК 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность», подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований».

Список литературы

- 1 Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.
- 2 Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Михайлова Е.А. Ионно-плазменные вакуумные покрытия — основа широкого повышения качества изделий машиностроения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. — Донецк: ДонНТУ, 2004. — Вып. 28. — С. 108–115.
- 3 Берлин Е., Двинин С., Сейдман Л. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. — М.: Техносфера, 2007. — 472 с.
- 4 Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий // Вопросы атомной науки и техники. — 2008. — № 2. — С. 119–130.
- 5 Palumbo G., Erb U., Aust K. Triple line delamination effect on the mechanical behavior of materials // Scripta Metallurgica et Materialia. — 1990. — Vol. 24. — P. 1347–1350.
- 6 Veprek S., Veprek-Heijman M., Karvankova P. et al. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites // Thin Solid Films. — 2005. — Vol. 476. — P. 1–29.
- 7 Zwang R.F., Veprek S. Crystalline-to-amorphous transition in $Ti_{1-x}Si_xN$ solid solution and the stability of free SiN studied by combined ab initio density functional theory and thermodynamic calculation // Physical review. — 2007. — Vol. 76. — P. 174–185.
- 8 Watanabe H., Sato Y., Nie C. et al. The mechanical properties and microstructure of Ti-Si-N nanocomposite films by ion plating // Surf. and Coat. Technol. — 2003. — Vol. 169–170. — P. 452–455.
- 9 Carvalho S., Ribeiro E., Rebouta L. et al. Effect of morphology and structure on the elastic behavior of (Ti, Si, Al)N nanocomposites // Surf. and Coat. Technol. — 2003. — Vol. 174–175. — P. 984–991.
- 10 Flink A., Larson T., Sjolen J. et al. Influence of Si on the microstructure of arc evaporated (Ti, Si)N thin films; evidence for cubic solid solutions and their thermal stability // Surf. and Coat. Technol. — 2005. — Vol. 200. — P. 1535–1542.
- 11 Li Z.G., Mori M., Miyake S. et al. Structure and properties of Ti-Si-N films prepared by ISP assisted magnetron sputtering // Surf. and Coat. Technol. — 2005. — Vol. 193. — P. 345–349.
- 12 Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х. Влияние технологических параметров на свойства ионно-плазменных композиционных покрытий // Вестник КарГУ. Сер. Физика. — 2010. — № 4(60). — С. 28–38.
- 13 Кривообоков В.П., Сочугов Н.С., Соловьев А.А. Плазменные покрытия (свойства и применение). — Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. — 137 с.
- 14 Соколов И.В. Закономерности формирования структуры в поверхностном слое деталей из конструкционных металлических материалов в процессе вакуумной ионно-плазменной обработки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2009. — 23 с.
- 15 Гасанов И.С. Плазменная и пучковая технология. — Баку: Элм, 2007. — 175 с.
- 16 Thornton J.A. Structure and topography of sputtering coatings // Ann. Rev. Material Sci. — 1977. — Vol. 7. — P. 239–260.
- 17 Barna P.B., Adamik M. Formation and Characterization of the structure of surface coating // Protective Coatings and Thin Films / Ed. Y. Pflau, P.B. Barna. — Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 1977. — P. 279–297.
- 18 Vlasek J. Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties // J. Surf. Coat. Technol. — 2001. — Vol. 142–144. — P. 557–566.
- 19 Псахье С.Г., Зольников К.П., Коноваленко И.С. Синтез и свойства нанокристаллических и субструктурных материалов. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2007. — 264 с.
- 20 Соболев О.В., Андреев А.А., Горбань В.Ф. и др. О воспроизводимости однофазного структурного состояния многоэлементной высокоэнтропийной системы Ti-V-Zr-Nb-Hf и высокопрочных нитридов на ее основе при их формировании вакуумно-дуговым методом // Письма в ЖТФ. — 2012. — Т. 38, Вып. 13. — С. 40–47.
- 21 Панин В.Е., Макаров П.В., Псахье С.Г. и др. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. — Новосибирск: Наука, 1995. — Т. 2. — 320 с.
- 22 Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Абрамов А.В. Компьютерное моделирование микро- и наноструктур. — Саратов, 2008. — 100 с.
- 23 Аблесимов Н.Е. Релаксационные эффекты и фазообразование в неравновесных конденсированных системах: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. — Новосибирск, 2000. — 38 с.
- 24 Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. (Послесловие). — М.: Мир, 2002. — С. 441.
- 25 Бондаревский С.И., Аблесимов Н.Е. Релаксационные эффекты в неравновесных конденсированных системах. Самооблучение в результате радиоактивного распада. — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 232 с.
- 26 Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвердость металлов. — М.: Гостехиздат, 1962. — 224 с.
- 27 Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. — М.: Наука, 1987. — 240 с.
- 28 Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. — М.: Мир, 1991. — 240 с.

- 29 Заславский Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах. — Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2004. — 288 с.
- 30 Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Шиманский-Гайер Л. Динамическое и статистическое описание колебательных систем. — Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2005. — 156 с.
- 31 Khrig E., Beberdich H. Dissipative Structures. — Leipzig: VEB Georg Thieme, 1977. — 342 p.
- 32 Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Образование ячеистой наноструктуры при формировании ионно-плазменных покрытий // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Тр. 8-й Междунар. науч. конф. — Караганда: Изд-во КарГУ, 2012. — С. 288–294.
- 33 Мищенко Е.Ф., Садовничий В.А., Колесов А.Ю., Розов Н.Х. Автоволновые процессы в нелинейных средах с диффузией. — М.: Физматлит, 2010. — 395 с.
- 34 Юров В.М. Некоторые вопросы физики поверхности твердых тел // Вестн. КарГУ. Сер. Физика. — 2009. — № 1 (53). — С. 45–54.

В.Ч.Лауринас, О.Н.Завацкая, В.М.Юров, С.А.Гученко

Ионды-плазмалық жабуларды қалыптастырған кездегі автотолқынды процестер

Мақалада ионды-плазмалық жабулардың микроқатандығын зерттеу нәтижелері талданды. Жабуларды жасау үшін бір және көп камералы плазмалық ағындар пайдаланылды. Жабуларды жасағанда аргон және азот атмосферасы қолданылды. Эксперименттік мәліметтер бойынша, жабулардың микроқатандығы үлгі бетінде квазипериодты өзгеретіні байқалды. Жабулардың периодтық құрылымын қалыптастыруға арналған модель ұсынылды. Модель теориясының негізі жабуларды қалыптастырған кезде буландырылатын ағындар компоненттерінің концентрациялық градиенті есебінен пайда болатын автотербелістік қозғалыстардың тууына негізделген.

V.Ch.Laurinas, O.N.Zavatskaya, V.M.Yurov, S.A.Guchenko

Autowave processes at formation Ionic-plasma coverings

In work results of research of microhardness of ionic-plasma coverings are discussed. For reception of coverings unicomponent and multicomponent plasma streams were used. Sedimentation of coverings was made in argon and nitrogen atmosphere. Experimental data show, that microhardness of coverings quasiperiodical changes on a surface of the sample. The model of formation of periodic structure of a covering is offered. The model is based on occurrence of self-oscillatory movements at formation of a covering at the expense of concentration gradients a component of besieged streams.

References

- 1 Barvinok V.A. *Upravlenie napryazhennym sostoyaniem i svoystva plazmennyykh pokrytiy* [Management of an intense condition and properties of plasma coverings], Moscow: Mashinostroenie, 1990, 384 p.
- 2 Mikhaylov A.N., Mikhaylov V.A., Mikhaylova E.A. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov* [Progressive technologies and mechanical engineering systems: International Collection of Scientific Works], Donetsk: DNTU Publ., 2004, 28, p. 108–115.
- 3 Berlin E., Dvinin S., Seydman L. *Vakuumnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya naneseniya i travleniya tonkikh plenok* [Vacuum technology and the equipment for drawing and etching of thin films], Moscow: Tekhnosfera, 2007, 472 p.
- 4 Reshetnyak E.N., Strel'nitskiy V.E. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Questions of a nuclear science and technics], 2008, 2, p. 119–130.
- 5 Palumbo G., Erb U., Aust K. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1990, 24, p. 1347–1350.
- 6 Veprek S., Veprek-Heijman M., Karvankova P. et al. *Thin Solid Films*, 2005, 476, p. 1–29.
- 7 Zwang R.F., Veprek S. *Physical review*, 2007, 76, p. 174–185.
- 8 Watanabe H., Sato Y., Nie C. et al. *Surf. and Coat. Technol.*, 2003, 169–170, p. 452–455.
- 9 Carvalho S., Ribeiro E., Rebouta L. et al. *Surf. and Coat. Technol.*, 2003, 174–175, p. 984–991.
- 10 Flink A., Larson T., Sjolen J. et al. *Surf. and Coat. Technol.*, 2005, 200, p. 1535–1542.
- 11 Li Z.G., Mori M., Miyake S. et al. *Surf. and Coat. Technol.*, 2005, 193, p. 345–349.
- 12 Yurov V.M., Guchenko S.A., Ibraev N.Kh. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Ser. Fizika* [Messenger of the Karaganda university, Ser. Physics], 2010, 4(60), p. 28–38.

- 13 Krivobokov V.P., Sochugov N.S., Solov'ev A.A. *Plazmennye pokrytiya (svoystva i primeneniye)* [Plasma coverings (properties and application)], Tomsk: Tomsk polytechnical university Publ., 2011, 137 p.
- 14 Sokolov I.V. *Zakonomernosti formirovaniya struktury v poverkhnostnom sloe detaley iz konstruksionnykh metallicheskih materialov v protsesse vakuumnoy ionno-plazmennoy obrabotki: Avtoferat dis.* [Laws of formation of structure in a blanket of details from constructional metal materials in the course of vacuum ionic-plasma processing: Dis. abstract], Moscow, 2009, 23 p.
- 15 Gasanov I.S. *Plazmennaya i puchkovaya tekhnologiya* [Plasma and beam technology], Baku: Elm, 2007, 175 p.
- 16 Thornton J.A. *Ann. Rev. Material Sci.*, 1977, 7, p. 239–260.
- 17 Barna P. B., Adamik M. *Protective Coatings and Thin Films*, 1977, Kluwer Academic, Dortrecht, The Netherlands, p. 279–297.
- 18 Vlasek J. *J. Surf. Coat. Technol.*, 2001, 142–144, P. 557–566.
- 19 Psakh'e S.G., Zol'nikov K.P., Konovalenko I.S. *Sintez i svoystva nanokristallicheskih i substrukturnykh materialov* [Synthesis and properties of nanocrystals and substructural materials], Tomsk: Tomsk State Univ. Publ., 2007, 264 p.
- 20 Sobol' O.V., Andreev A.A., Gorban' V.F. et al. *Pis'ma v ZhTF* [Letters in JTF], 2012, 38, 13, p. 40–47.
- 21 Panin V.E., Makarov P.V., Psakh'e S.G. et al. *Fizicheskaya mezomekhanika i komp'yuternoe konstruirovaniye materialov* [The physical mesomechanics and computer designing of materials], Novosibirsk: Nauka, 1995, 2, 320 p.
- 22 Usanov D.A., Skripal' A.I.V., Skripal' An.V., Abramov A.V. *Komp'yuternoe modelirovaniye mikro- i nanostruktur* [Computer modelling micro and nanostructures], Saratov, 2008, 100 p.
- 23 Ablesimov N.E. *Relaksatsionnye efekty i fazoobrazovanie v neravnovesnykh kondensirovannykh sistemakh: Avtoferat dis.* [Relaxation effects and formation of phases in the nonequilibrium condensed systems: Dis. abstract], Novosibirsk, 2000, 38 p.
- 24 Prigozhin I., Kondepudi D. *Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur (Posleslovie)* [The modern thermodynamics. From thermal engines to dissipative structures (Epilogue)], Moscow: Mir, 2002, p. 441.
- 25 Bondarevskiy S.I., Ablesimov N.E. *Relaksatsionnye efekty v neravnovesnykh kondensirovannykh sistemakh. Samooblucheniye v rezul'tate radioaktivnogo raspada* [Relaxation effects in the nonequilibrium condensed systems. A self-irradiation as a result of radioactive disintegration], Vladivostok: Dal'nauka, 2002, 232 p.
- 26 Glazov V.M., Vigdorovich V.N. *Mikrotverdost' metallov* [Microhardness of metals], Moscow: Gostechizdat, 1962, 224 p.
- 27 Vasil'ev V.A., Romanovskiy Yu.M., Yakhno V.G. *Avtovolnovyye protsessy* [Autowave processes], Moscow: Nauka, 1987, 240 p.
- 28 Khaken G. *Informatsiya i samoorganizatsiya: Makroskopicheskiy podkhod k slozhnym sistemam* [The information and self-organising: the Macroscopical approach to difficult systems], Moscow: Mir, 1991, 240 p.
- 29 Zaslavskiy G.M. *Fizika khaosa v gamil'tonovykh sistemakh* [Physics of chaos in hamilton systems], Moscow-Izhevsk: Institute of computer researches, 2004, 288 p.
- 30 Anishchenko V.S., Vadivasova T.E., Shimanskiy-Gayer L. *Dinamicheskoe i statisticheskoe opisaniye kolebatel'nykh sistem* [The dynamic and statistical description of oscillatory systems], Moscow-Izhevsk: Institute of computer researches, 2005, 156 p.
- 31 Kahrig E., Beberdich H. *Dissipative Strukturen*, Leipzig: VEB Georg Thieme, 1977, 342 p.
- 32 Yurov V.M., Laurinas V.Ch., Guchenko S.A., Zavatskaya O.N. *Khaos i struktury v nelineynykh sistemakh. Teoriya i eksperiment: Trudy 8-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Chaos and structures in nonlinear systems. The theory and experiment: Works of the VIII International scientific conference], Karaganda: KarSU Publ., 2012, p. 288–294.
- 33 Mishchenko E.F., Sadovnichiy V.A., Kolesov A.Yu., Rozov N.Kh. *Avtovolnovyye protsessy v nelineynykh sredakh s diffuziey* [Autowave processes in nonlinear environments with diffusion], Moscow: Fizmatlit, 2010, 395 p.
- 34 Yurov V.M. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Ser. Fizika* [Messenger of the Karaganda university, Ser. Physics], 2009, 1(53), p. 45–54.