

Аналіз існуючих моделей виникнення напружень в тонких плівках і покриттях

*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Проведено аналіз існуючих моделей виникнення напружень у тонких плівках і покриттях. Напруження при досягненні певних критичних значень можуть призводити до появи в них дефектів, тріщин, відшарування їх від підкладки тощо. Проблема прогнозування і керування знаком і величиною напружень системи покриття-підкладка є актуальною незалежно від методу отримання покриттів і тонких плівок, які знайшли застосування майже у всіх галузях промисловості: оптиці, машинобудуванні, вимірювальній техніці, медицині, мікро- та наноелектроніці тощо. Дослідження нових перспективних методів формування наноструктур, наприклад отримання нанодротів в умовах плазмового середовища, потребує наявності достатньої теоретичної бази при вирішенні питань зародження й розвинення напружень. Причинами виникнення напружень у тонких плівках і покриттях можуть бути: хімічні реакції, фазові перетворення, включення і домішки, бомбардування частинками (внутрішні напруження в процесі зростання покриттів); зміна температур (термічні напруження внаслідок різних значень коефіцієнтів термічного розширення матеріалів покриттів і підкладки, можуть розвиватися після завершення процесу напильовання і охолодження системи покриття-підкладка); деформація системи покриття-підкладка тощо. Моделі виникнення напружень можна умовно поділити на такі групи: напруження, що виникають на межі поділу покриття-підкладка, в середині покриття, та на межі поділу покриття-наколишнє середовище. В роботі також наведено методики вимірювання напружень у тонких плівках і покриттях. За одержаними результатами можна зробити висновок, що існуючі моделі виникнення напружень як в процесі зростання покриттів і плівок, так і напружень, що виникають під дією зовнішніх сил, на жаль, не дозволяють зрозуміти їх комплексного впливу на напружено-деформований стан системи покриття-підкладка та потребують подальшого розвитку і уточнення. Важливими також є питання релаксації напружень для отримання нових структур і певних властивостей покриттів. Розроблення інструментів керування напруженнями можна розглядати як один із шляхів підвищення ресурсу виробів з покриттями й тонкими плівками.

Ключові слова: напружено-деформований стан, напруження, нанотехнологія, тонкі плівки і покриття, руйнування покриттів.

Вступ

Руйнування тонких плівок і покриттів є однією з основних причин виходу з ладу деталей і виробів, на які вони нанесені, що спричинено спільною дією внутрішніх механічних напружень (далі – напружень), напружень, що виникають у процесі їх формування (залишкових), і напружень, що зв'язуються під час експлуатації. Руйнування плівок і покриттів може виявлятися у вигляді утворення тріщин під дією розтягальних напружень [1, 2] або відшарування, викривлення або случування при стискаючих напруженнях [3–6]. Залишкові напруження, що виникають у покриттях і плівках, впливають майже на всі основні експлуатаційні характеристики деталей. Крім можливості розвитку тріщин і відшарувань, залишкові напруження впливають на адгезійну й когезійну, статичну і багатоциклову міцності, зносостійкість, термостійкість тощо.

У той же час напруження можуть позитивно впливати на фізичні властивості тонких шарів і наноструктур, наприклад, електропровідність [7], діелектричну проникність [8], п'єзоелектричність, магнітну анізотропію та магнітопружний зв'язок [9, 10] або збільшення рухливості носіїв заряду в напівпровідниках на основі кремнію [11].

Вуглецеві та оксидні наноструктури різноманітної структури й властивостей є перспективними матеріалами для використання в наноелектроніці та інших галузях промисловості. Наноструктури на основі кремнію розглядаються як потенційні матеріали для виробництва наступного покоління анодів літій-іонних акумуляторів завдяки їх надвисоким питомим потужностям [12–14]. Вертикально-орієнтовані структури графену завдяки їх властивостям можуть бути застосовані для акумулювання та зберігання електрохімічної енергії (у високопродуктивних суперконденсаторах, каталізаторах паливних елементів тощо) [15, 16]. При виготовленні сучасних напівпровідників, польових транзисторів, датчиків широко застосовуються оксидні наноструктури, властивості яких значною мірою залежать від методів і умов їх формування [17–19]. Процес зростання оксидних і вуглецевих шарів і структур супроводжується адсорбцією атомів газів [20, 21], що призводить до розвинення напружень у середині наноплівки.

Таким чином, розуміння природи виникнення напружень у тонких плівках і покриттях, а також можливість керування напружено-деформованим станом системи покриття-підкладка є актуальним завданням, оскільки це безпосередньо впливає на формування, обробку і термін служби нових матеріалів і виробів. Розвиток теоретичної бази прогнозування та регулювання значень і знака напружень, що виникають при формуванні наноструктур в умовах плазмового середовища, дозволить доповнити існуючі моделі отримання таких структур [22, 23] з метою подальшого дослідження плазмових методів вирощування наноструктур.

Основний матеріал

1. Причини виникнення напружень

Причинами виникнення і розвинення напружень у покриттях і тонких плівках можуть бути [24]:

1) напруження, пов'язані зі зростанням покриттів і плівок. У цьому випадку необхідно розрізняти внутрішні напруження, обумовлені збільшенням покриття, і напруження, що спричинені геометричними характеристиками поверхні. Зростання внутрішніх напружень відбувається внаслідок хімічних реакцій, фазових перетворень, бомбардувань частинками тощо;

2) термічні напруження, що з'являються у результаті зміни температур і різних коефіцієнтів термічного розширення матеріалів покриття й підкладки;

3) зовнішні напруження, що виникають внаслідок деформації системи покриття-підкладка.

У загальному випадку розподіл напружень між плівкою та підкладкою є складним і неоднорідним, хоча деякі спрощення дозволяють зрозуміти характер їх розподілу. На рис. 1 схематично зображено ідеальний розподіл напружень у поперечному перерізі гомогенної плівки та вільно встановленої підкладки подалі від краю [25].

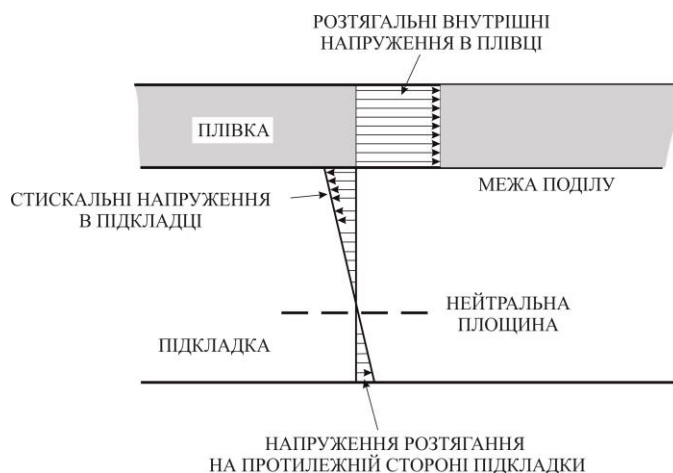


Рис. 1. Розподіл напружень у поперечному перерізі плівки та підкладки

Розподіл напружень визначається вимогами рівності нулю сумарних нормальних сил і згинальних моментів по всьому поперечному перерізі. Перша вимога означає, що в підкладці мають формуватися напруження протилежного знака, тому на поверхні напруження мають протилежний знак. Друга вимога означає, що підкладка має зігнути, щоб компенсувати згинальний момент під дією плівки на одній з її поверхонь. Тому напруження в підкладці мають змінювати знак, як показано на рис. 1. Якщо товщина плівки значно менше товщини підкладки (наноплівки), то напруження в підкладці становлять лише малу частку напружень у плівці. У таких випадках можна знехтувати вигином підкладки. Внутрішні напруження мають дорівнювати нулю на вільному кінці плівки (рис. 2) [25]. Зазвичай, внутрішні напруження відносно рівномірно розподілені по товщині плівки (як показано на рис. 1). Дотичні напруження на межі поділу пропорційні товщині плівки і градієнту внутрішніх напружень уздовж межі [26], тому дотичні напруження є максимальними на краю плівки.

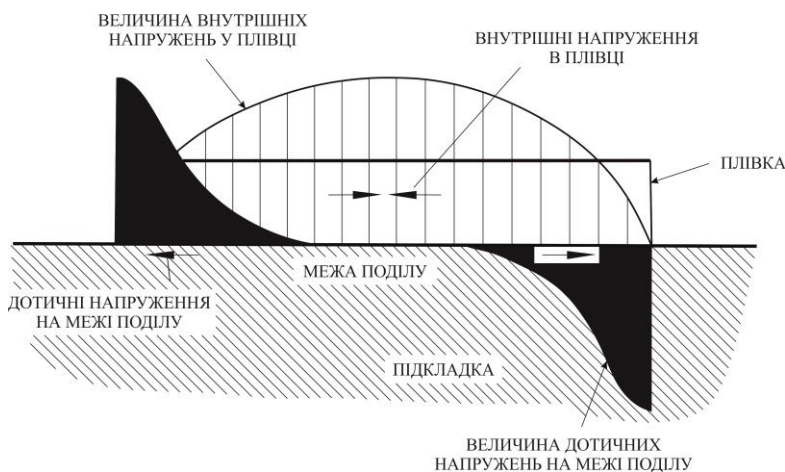


Рис. 2. Розподіл дотичних напружень на межі поділу плівка-підкладка

1.1. Внутрішні напруження, пов'язані зі зростанням покриттів

Модель, що пов'язує межі зерен з формуванням напружень у тонких плівках, вперше була запропонована в роботі [27]. Модель основана на тому, що із зростанням плівки і проходженням її через морфологічні стадії (ізолювані атомні кластери, центри кристалізації, островкова плівка, суцільна плівка),

міжатомні сили тяжіння, що діють у зазорах між сусідніми зернами, призводять до пружної деформації меж зерен. Така деформація компенсується розтягальними силами, що діють у середині зерен, і є наслідком адгезії плівки до підкладки. Середнє значення зміни положення атомів межі зерен через примусову релаксацію Δ має вигляд

$$\Delta \approx \frac{ar - r^2/2}{2a - r}, \quad (1)$$

де a – стала величина ґратки об'ємного матеріалу;

r – відстань максимального наближення, що дорівнює сумі іонних радіусів, $r = 2r$, що було отримано в роботі [28] з використанням потенціалу взаємодії двох атомів. Уздовж меж зерен формуються локальні області стиснення і розтягування, але результуюче напруження є розтягальними.

Внутрішні напруження в плівці згідно з цією моделлю можна знайти з рівняння

$$\sigma \approx \frac{E\Delta}{(1-\nu)d} \rho, \quad (2)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона;

ρ – щільність упаковки.

Таким чином, для розрахунку напружень необхідно мати інформацію про кінцевий розмір зерна і пружні властивості.

Однією з причин виникнення розтягальних напружень у плівках і покриттях можуть бути дефекти (пори), які розвиваються у результаті рекристалізації та перебудови структури. Якщо самодифузія матеріалу покриття досить велика, то під час і після осадження можуть відбуватися процеси рекристалізації [29]. При цьому всі види дефектів (межі зерен, пори, точкові дефекти тощо) усуваються, що може призвести до ущільнення плівки. В роботі [30] запропоновано, що підсумкове ущільнення плівки впливає на розтягальну складову напружень:

$$\sigma_{recr} = \frac{2E}{1-\nu} \Delta v_{ex} \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D} \right). \quad (3)$$

Слід зауважити, що в запропонованій моделі не враховано внесок напружень, пов'язаних з релаксацією напружених ділянок через рекристалізацію. Залежно від знака деформації це можуть бути розтягальні напруження (наприклад, через наявність нерівноважних малокутових меж зерен) або стискальні (внаслідок капілярних явищ (напружень)). Подальшим розвитком отриманих результатів є робота [31], в якій було наведено рівняння швидкості формування напружень, а також розрахунок напружень під час відпалу.

На розвиток внутрішніх напружень, що виникають у процесі нанесення тонких плівок і покриттів, впливають точкові дефекти. Одним із важливих механізмів розвитку напружень у плівках, отриманих методом розпилювання, є так званий «атомний наклеп» (англ. atomic peening) [32]. Оскільки атоми, що розпилюються, мають високу кінетичну енергію, то при зіткненні зі зростаючою плівкою частина енергії може поглинатися в її поверхневий шар, в міжвузля кристалічної ґратки. Це призводить до дисторсії кристалічної решітки і надлишкового ущільнення плівки. Як наслідок у ній виникають стискальні

напруження, величина яких прямо пропорційна молярному об'єму та біаксиальному модулю пружності плівки [33].

Пізніше було проведено кількісне моделювання цього механізму [34]. Воно ґрунтується на теорії лінійного каскаду прямих зіткнень «переданого розпилення», запропонованого в роботі [35]. За допомогою рентгенівської дифракції отримано експериментальне підтвердження зміни кристалічних ґрат [36, 37]. На основі цих припущень одержано рівняння розрахунку стискальних напружень у плівці:

$$\sigma_f = k\Phi\sqrt{E_p} \frac{EM}{(1-\nu)D}, \quad (4)$$

де k – множник, що містить число Авогадро та інші числові константи;

Φ – потік іонів;

E_p – енергія частинки;

E – модуль Юнга;

ν – коефіцієнт Пуассона;

M – атомна маса частинки;

D – щільність мішені.

Разом з атомами матеріалу, що розпилюється, в міжвузля кристалічних ґрат можуть потрапляти і домішкові атоми та іони, наприклад іони інертного газу, що використовуються для бомбардування мішені [38]. У моделях механізму розвитку напружень при імплантації атомів та іонів напилених плівок розглядають як матрицю, що містить введені частинки. В цьому випадку напружено-деформований стан плівки являє собою комбінацію гідростатичних напружень, обумовлених безпосередньо утворенням дефекту, і біаксиальних напружень, спричинених обмеженнями змін розмірів плівок, які на них накладає підкладка [39–41].

Інший тип точкових дефектів – вакансії – також може бути джерелом виникнення внутрішніх напружень у тонких плівках. Оскільки плівки і покриття осідають у високонерівновісних умовах, то вони містять велику кількість вакансій. Релаксаційні процеси, що протікають як під час осадження плівок, так і після закінчення цього, приводять до впорядкування їх структури, зокрема до анігіляції вакансій. В результаті виникають внутрішні напруження, знак і величина яких залежать від парціального молярного об'єму вакансій, а також від місця розташування анігіляції [42].

Внутрішні напруження в плівках і покриттях також можуть виникати внаслідок фазових перетворень, що відбуваються всередині них у процесі осадження, утворення нових фаз, а також за наявності домішок. Це можуть бути реакції, обумовлені взаємною дифузією атомів плівки і підкладки або дифузією між різними шарами в багатшарових структурах [43–45]. Крім того, можливими є хімічні реакції атомів плівки з молекулами залишкових газів, або з потрапившими домішковими атомами [46].

1.2. Напруження, що розвиваються в тонкоплівкових структурах при зовнішніх впливах

Значний внесок у загальний рівень напружень у тонких плівках і покриттях роблять термічні напруження. Вони розглядаються як зовнішні, оскільки спричинені змінами температури, що відбуваються зазвичай після закінчення процесу осадження плівок. Крім того, термічні напруження можуть розвиватися

при термічному обробленні плівок після їх нанесення, а також внаслідок зміни температури в процесі експлуатації тонких плівок і покриттів.

Причиною розвитку напружень в тонкоплівкових структурах при зміні температури є різниця коефіцієнтів термічного розширення (КТР) плівки і підкладки. У випадку оксидних і керамічних покриттів, нанесених на металеву підкладку, КТР кераміки значно нижче, ніж КТР металу. При охолодженні в таких плівках і покриттях розвиваються стискальні напруження, а при нагріванні – розтягальні [47].

Якщо система плівка-підкладка охолоджується або нагрівається при температурі від T_1 до T_2 , то біаксіальна деформація плівки, що розвивається при цій зміні температур, визначається так:

$$\varepsilon = -(\alpha_f - \alpha_s)(T_2 - T_1) = -\Delta\alpha\Delta T, \quad (5)$$

де α_f і α_s – КТР матеріалів плівки і підкладки відповідно.

Якщо температура змінюється в процесі осадження плівки, то різні шари плівки будуть сприймати різну деформацію. При цьому середню біаксіальну деформацію можна розраховувати за допомогою співвідношення [42]

$$\varepsilon \approx -\Delta\alpha \left(T_2 - \frac{1}{h_f} \int_0^h T(z) dz \right), \quad (6)$$

де h_f – товщина плівки;

dz – приріст її товщини.

Оскільки біаксіальні напруження пов'язані з деформацією як

$$\sigma = \frac{E_f}{1 - \nu_f} \varepsilon, \quad (7)$$

то термічні напруження прямо пропорційні зміні температури:

$$\sigma = -\frac{E_f}{(1 - \nu_f)} \Delta\alpha\Delta T. \quad (8)$$

Значний вплив на розвиток напружень в провідникових плівках мають процеси електроміграції. Згідно з розрахунками, виконаними в роботі [48], після того, як величина таких напружень досягає деякого граничного значення (σ_t^\pm), починається їх релаксація. Стискальні напруження (при $\sigma > \sigma_t^+$) сприяють зростанню здутості на поверхні плівки, а розтягальні напруження (при $\sigma > \sigma_t^-$) призводять до утворення порожнин.

Істотний вплив на розвиток напружень у тонких плівках мають ефекти, пов'язані з електромагнітним полем. Перш за все до них належать п'єзоелектричний ефект [49–51], електро- [52] і магнітострикції [53, 54].

Під час зберігання і експлуатації в тонкоплівкових структурах під дією зовнішніх чинників можуть відбуватися хімічні і структурні зміни, які, як і в процесі збільшення плівок, призводять до виникнення механічних напружень. Так було виявлено, що плівки можуть абсорбувати з навколишнього повітря значну кількість вологи, при цьому в них розвиваються значні стискальні напруження [55]. Нагрівання таких плівок, навпаки, спричиняє випаровування з них вологи та виникнення розтягальних напружень.

Слід додати, що тонкі плівки і покриття в процесі експлуатації можуть безпосередньо піддаватися різним механічним впливам, які призводять до розвитку в них напружень. Наприклад, гнучкі тонкоплівкові структури, що мають

великі перспективи використання, в процесі експлуатації сприймають багаторазову згинальну деформацію, що призводить до розвитку в них неоднорідно розподілених градієнтів механічних напружень [56, 57].

2. Методи вимірювання напружень у тонких плівках і покриттях

На сьогоднішній день не існує методів прямого вимірювання механічних напружень, що діють всередині плівки. Напруження визначаються побічно: проводиться вимірювання переміщень, що виникають під дією напружень, потім – перерахунок переміщень в напруження за відповідними формулами.

Існуючі методи визначення напружень у тонких плівках можна поділити за типом фізичного явища. Вибір відповідного методу може залежати від багатьох чинників і потреб дослідження: *in situ* (вимірювання в процесі нанесення покриття) або *ex situ* (вимірювання після нанесення покриття), матеріалу підкладки, типу структури плівка-підкладка і т.д. Найбільш широко використовуються два основні методи для визначення напружень у тонких плівках. Перший метод оснований на вимірюванні кривизни підкладки, яка згинається під дією напружень у плівці, другий – на безпосередньому вимірюванні пружної деформації в плівці за допомогою рентгенівської дифракції. У першому випадку для визначення напружень у плівці необхідно знати пружні властивості підкладки, а в другому – пружні властивості матеріалу плівки.

2.1. Метод визначення напружень на основі вимірювання радіуса кривизни підкладки

Найбільш поширені методи визначення напружень у тонких плівках, отриманих на поверхні підкладки у вигляді кола або балки (тонкої пластини), оснований на вимірюванні деформації підкладки. Вперше визначення напружень у тонких плівках шляхом розрахунку кривизни підкладки було виконано в роботі [58]. Для розрахунку напружень використано формулу, що пов'язує напруження в плівці σ_f і радіус кривизни підкладки R_s :

$$\sigma_f = \frac{E_s t_s^2}{6 R_s t_f}, \quad (9)$$

де E_s – модуль пружності підкладки;

t_s – товщина підкладки;

R – радіус кривизни підкладки;

t_f – товщина плівки.

До основних недоліків формули слід віднести:

- формула використовується у випадку, коли плівка покриває всю поверхню підкладки;

- усвідомлення, що напруження в плівці одновісні, що для ізотропних підкладок не є вірним – напруження двовісні. Коректну форму рівняння, таким чином, у цьому випадку можна записати у вигляді [59]

$$\sigma_f = \frac{E_s t_s^2}{6(1-\nu_s) R_s t_f}, \quad (10)$$

де ν_s – коефіцієнт Пуассона підкладки.

Частіше за все в літературі можна зустріти дві конфігурації плівки-підкладки для визначення напружень: у вигляді диска та у вигляді балки

(пластини). При використанні методу згинання консольної балки плівку осаджують на одну з поверхонь консольно закріпленої балки. Кривизну балки знаходять шляхом вимірювання відхилення одного з її кінців, в той час як інший кінець закріплений, або за вигином середини балки у випадку закріплення обох її кінців. При цьому питому силу S , рівномірно розподілену по ширині пластинки, визначають через напруження і товщину в плівці:

$$S = \sigma_f d_f = \frac{\delta E_s d_s^2}{3l^2 (1 - \nu_s)}. \quad (11)$$

Визначення радіуса кривизни підкладки виконують за допомогою датчиків: оптичних [60–62] і ємнісних [63, 64]; методом витравлювання підкладки [65]; механічними [66], електромеханічними [67] або магнітними методами вимушеного повернення зразка в початковий стан [68, 69]. Найбільш чутливими методами, що дозволяють проводити вимірювання безпосередньо під час осадження, є методи з використанням оптичних (із застосуванням лазера) і ємнісних датчиків. Ці методи дозволяють визначати напруження в плівках під час їх початкового зростання, тобто тоді, коли плівка складається з ізольованих острівців.

2.2. Рентгеноструктурні вимірювання

Рентгеноструктурний аналіз є потужним інструментом для виявлення характерних ознак мікроструктури плівок, зокрема для вимірювання параметрів кристалічної ґратки. Деформація кристалічної ґратки може бути визначена за результатами рентгенівської дифракції, а напруження розраховані з припущенням лінійного пружного викривлення ґратки. Деталі теоретичних аспектів, а також інтерпретація вимірів за допомогою рентгеноструктурного аналізу докладно описано в роботі [70]. Найчастіше використовуються три техніки вимірювання напружень за допомогою рентгеноструктурного аналізу, які ґрунтуються на моделі плоского напруженого стану; більш докладно з кожною можна ознайомитися в роботі [70].

Основним недоліком методик, оснований на рентгеноструктурному аналізі, є відсутність можливості вимірювання напружень безпосередньо під час осадження.

Висновки

Незважаючи на велику кількість даних про існування напружень у тонких плівках і покриттях, на сьогоднішній день не існує загальної теорії, яка б описувала формування напружень в них. За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що процеси формування напружень є дуже чутливими до методу отримання плівок і покриттів, а також умов проведення експерименту. Існуючі моделі дозволяють лише частково зрозуміти природу розвитку напружень, а експериментальні результати часто суперечать один одному, що ставить під сумнів ту чи іншу модель. Крім того, жоден з механізмів не дозволяє ні кількісно ні якісно оцінити досягнення критичного стану в плівці, тобто визначити умови, що характеризують руйнування тонкоплівкових структур. Отже, розроблення моделі формування напружень в тонких плівках і покриттях з урахуванням фізичних процесів, що впливають на остаточний розподіл, рівень напружень, і визначення їх критичних значень є актуальним завданням.

Подяки

Автор висловлює подяку Національному фонду досліджень України за підтримку (конкурс «Підтримка досліджень провідних та молодих учених», номер проєкту 2020.02/0119).

Список літератури

1. Mechanical behavior of metallic thin films on polymeric substrates and the effect of ion beam assistance on crack propagation / M. George, C. Coupeau, J. Colin, J. Grilhé // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53. – iss. 2. – P. 411-417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.09.036>
2. The influence of a brittle Cr interlayer on the deformation behavior of thin Cu films on flexible substrates: Experiment and model / V. M. Marxab, F. Tothc, A. Wiesinger, J. Berger, Ch. Kirchlechner, M. J. Cordill, F. D. Fischer, F. G. Rammerstorfer, G. Dehma // *Acta Materialia*. – 2015. – Vol. 89. – P. 278-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.01.047>
3. Atomic force microscopy study of the morphological shape of thin film buckling / C. Coupeau // *Thin Solid Films*. – 2002. – Vol. 406, – iss. 1-2. – P. 190-194. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01772-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01772-2)
4. An experimental study of the influence of imperfections on the buckling of compressed thin films / M.-W. Moon, J.-W. Chung, K.-R. Lee, K. H. Oh, R. Wang, A. G. Evans // *Acta Materialia*. – 2002. – Vol. 50. – iss. 5. – P. 1219-1227. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00423-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00423-2)
5. How soft substrates affect the buckling delamination of thin films through crack front sink-in / R. Boijoux, G. Parry, J.-Y. Faou, C. Coupeau // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 110. – iss. 14. – P. 141602. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4979614>
6. From telephone cords to branched buckles: A phase diagram / J.-Y. Faou, S. Grachev, E. Barthel, G. Parry // *Acta Materialia*. – 2017. – Vol. 125. – P. 524-531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.025>
7. Enhanced Proton Conductivity in Y-Doped BaZrO₃ via Strain Engineering / A. Fluri, A. Marcolongo, V. Roddatis, A. Wokaun, D. Pergolesi, N. Marzari, T. Lippert // *Advanced Science*. – 2017. – Vol. 4. – iss. 12. – P. 1700467. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201700467>
8. Growth stress induced tunability of dielectric permittivity in thin films / K. V. L. V. Narayanachari, H. Chandrasekar, A. Banerjee, K. B. R. Varma, R. Ranjan, N. Bhat, S. Raghavan // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – Vol. 119. – iss. 1. – P. 014106. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4939466>
9. Sander, D. The correlation between mechanical stress and magnetic anisotropy in ultrathin films / D. Sander // *Reports on Progress in Physics*. – 1999. – Vol. 62. – iss. 5. – P. 809-858.
10. Sander, D. The role of surface stress in structural transitions, epitaxial growth and magnetism on the nanoscale / D. Sander, Z. Tian, J. Kirschner // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2009. – Vol. 21, iss. 13. – P. 134015. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/13/134015>
11. Lee, M. L. Strained Si, SiGe, and Ge channels for high-mobility metal-oxide-semiconductor field-effect transistors / M. L. Lee, E. A. Fitzgerald // *Journal of Applied Physics*. – 2005. – Vol. 95. – iss. 1. – P. 011101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1819976>

12. Vertical Graphene Growth on SiO Microparticles for Stable Lithium Ion Battery Anodes / L. Shi, C. Pang, S. Chen, M. Wang, K. Wang, Z. Tan, P. Gao, J. Ren, Y. Huang, H. Peng, Z. Liu // *Nano Letters*. – 2017. – Vol. 17. – iss. 6. – P. 3681-3687. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00906>
13. Growing vertical graphene sheets on natural graphite for fast charging lithium-ion batteries / Y. Mu, M. Han, J. Li, J. Liang, J. Yu // *Carbon*. – 2021. – Vol. 173. – P. 477-484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.027>
14. Vertically-oriented graphene nanowalls: Growth and application in Li-ion batteries / Q. Yang, J. Wu, S. Li, L. Zhang, J. Fu, F. Huang, Q. Cheng // *Diamond and Related Materials*. – 2019. – Vol. 91. – P. 54-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.11.007>
15. Zhang, Z. Vertically Aligned Graphene Nanosheet Arrays: Synthesis, Properties and Applications in Electrochemical Energy Conversion and Storage / Z. Zhang, C.-S. Lee, W. Zhang // *Advanced Energy Materials*. – 2017. – Vol. 7. – iss. 23. – P. 1700678. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201700678>
16. Facile growth of vertically-aligned graphene nanosheets via thermal CVD: The experimental and theoretical investigations / H. Wang, E. Gao, P. Liu, D. Zhou, D. Geng, X. Xue, L. Wang, K. Jiang, Z. Xu, G. Yu // *Carbon*. – 2017. – Vol. 121. – P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.05.074>
17. Study of CuO Nanowire Growth on Different Copper Surfaces / G. Fritz-Popovski, F. Sosada-Ludwikowska, A. Köck, J. Keckes, G. A. Maier // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37172-8>
18. Cu₂O/CuO heterojunction catalysts through atmospheric pressure plasma induced defect passivation / Avishek Dey, Gauthaman Chandrabose, A. Lois, O. Dampney, E. S. Erakulan, R. Thapa, S. Zhuk, G. K. Dalapati, S. Ramakrishna, N. St. J. Braithwaite, A. Shirzadi, S. Krishnamurthy // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 541. – P. 148571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148571>
19. Macroscale synthesis of CuO nanowires on FTO plane substrate / Y. Mabuchi, R. N. Mohamed, X. Li, J. Liang, N. Kishi, T. Soga // *Modern Physics Letters B*. – 2019. – Vol. 33. – iss. 11. – P. 1950138. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0217984919501380>
20. Adsorption of H₂, CO₂, CH₄, CO, N₂ and H₂O in activated Carbon and Zeolite for Hydrogen production / F. V. S. Lopes, C. A. Grande, A. M. Ribeiro, J. M. Loureiro, O. Evaggelos, V. Nikolakis, A. E. Rodrigues // *Separation Science and Technology*. – 2009. – Vol. 44. – P. 1045-1073. DOI: <https://doi.org/10.1080/01496390902729130>
21. Adsorption of CO₂, CH₄, and N₂ in Activated Carbon Honeycomb Monolith / R. P. Ribeiro, T. P. Sauer, F. V. Lopes, R. F. Moreira, C. A. Grande, A. E. Rodrigues // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 2008. – Vol. 53. – P. 2311-2317. DOI: <https://doi.org/10.1021/jc800161m>
22. Baranov, O. Towards a highly-controllable synthesis of copper oxide nanowires in radio-frequency reactive plasma: fast saturation at the targeted size / O. Baranov, G. Filipič, U. Cvelbar // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2019. – № 28. – P. 084002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aae12e>
23. Баранов, О. О. Теоретична модель формування одновимірних наноструктур оксиду міді в умовах плазмового середовища [Текст] / О. О. Баранов // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології :

Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2020. – № 88. – С. 141 – 161. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2020.88.11>

24. Teixeira, V. Residual stress and cracking in thin PVD coatings / V. Teixeira // *Vacuum*. – 2002. – Vol. 64. – iss. 3-4. – P. 393-399. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00327-X](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00327-X)

25. Thornton, J.A. Stress-related effects in thin films / J.A. Thornton, D. Hoffman // *Thin Solid Films*. – 1989. – Vol. 171. – iss. 1. – P. 5-31. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(89\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(89)90030-8)

26. Hunt, R. A model of deadherence due to stresses in an elastic film / R. Hunt, B. Gale // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1972. – Vol. 5. – iss. 2. – P. 359-372. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/5/2/318>

27. Finegan, J., Hoffman, R. AEC Technical Report No. 18 / J. Finegan, R. Hoffman. – Case Institute of Technology, Cleveland, 1961 – 34 p.

28. Rottmayer, R. E. Solid state physics program. Growth effects thin nickel films: Technical Report No. 79 / R. E. Rottmayer. – Case Western Reserve Univ., Cleveland, Ohio., 1972. – 78 p.

29. Koch, R. Microstructural changes in vapour-deposited silver, copper and gold films investigated by internal stress measurements / R. Koch, R. Abermann // *Thin Solid Films*. – 1986. – Vol. 140. – iss. 2. – P. 217-226. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(86\)90265-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(86)90265-8)

30. Chaudhari, P. Grain growth and stress relief in thin films / P Chaudhari // *Journal of Vacuum Science and Technology*. – 1972. – Vol. 9. – iss. 1. – P. 520-522. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.1316674>

31. Doerner, M. F., Nix, W.D. Stresses and deformation processes in thin films on substrates / M. F. Doerner, W. D. Nix // *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*. – 1988. – Vol. 14. – iss. 3. – P. 225-268. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408438808243734>

32. D'Heurle, F. M. Aluminum films deposited by rf sputtering / F. M. D'Heurle // *Metall. Trans.* – 1970. – Vol. 1. – iss. 3. – P. 725-732. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02811600>

33. Windischmann, H. An intrinsic stress scaling law for polycrystalline thin films prepared by ion beam sputtering / H. Windischmann // *J. Appl. Phys.* – 1987. – Vol. 62. – iss. 5. – P. 1800-1807. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.339560>

34. Abermann, R., Koch, R. In situ study of thin film growth by internal stress measurement under ultrahigh vacuum conditions: Silver and copper under the influence of oxygen / R. Abermann, R. Koch // *Thin Solid Films*. – 1986. – Vol. 142. – iss 1. – P. 65-76.

35. Sigmund, P. Sputtering by ion bombardment theoretical concepts. In: Behrisch R. (eds) *Sputtering by Particle Bombardment I. Topics in Applied Physics*. – Springer, Berlin, Heidelberg. - 1981. – Vol. 47.– P. 9-71. DOI: https://doi.org/10.1007/3540105212_7

36. Effect of ion bombardment during deposition on the x-ray microstructure of thin silver films / T. C. Huang, G. Lim, F. Parmigiani, E. Kay // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 1985. – Vol. 3. – iss. 6. – P. 2161-2166. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.573271>

37. Kay, E. Effect of energetic neutralized noble gas ions on the structure of ion beam sputtered thin metal films / E. Kay, F. Parmigiani, W. Parrish // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 1987. – Vol. 5. – iss. 1. – P. 44-51. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.574135>

38. Windischmann, H. Intrinsic stress in sputter-deposited thin films // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* – 1992. – Vol. 17. – iss. 6. – P. 547-596. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408439208244586>
39. On the origin of stress in magnetron sputtered TiN layers / J.-D. Kamminga, Th. H. de Keijser, R. Delhez, E. J Mittemeijer // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 88. – iss. 11. – P. 6332-6345. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1319973>
40. Abadias, G. Diffraction stress analysis in fiber-textured TiN films grown by io-beam sputtering: Application to (001) and mixed (001)+(111) texture / G. Abadias, Y. Y. Tse // *J. App. Phys.* – 2004. – Vol. 95. – iss. 5. – P. 2414-2428. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1646444>
41. Stress field in sputtered thin films: Ion irradiation as a tool to induce relaxation and investigate the origin of growth stress / A. Debelle, G. Abadias, A. Michel, C. Jaouen // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 84. – iss. 24. – P. 5034-5036. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1763637>
42. Doerner, M. F. Stresses and deformation processes in thin films on substrates / M. F. Doerner, W. D. Nix // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* – 1988. – Vol. 14. – iss. 3. – P. 225- 268. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408438808243734>
43. White, G. E. In situ study of film stresses in metal silicides using absorption-edge-contour mapping / G. E. White, H. Chen // *J. Appl. Phys.* – 1990. – Vol. 68. –iss. 7. – P. 3317-3321. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.346384>
44. Buaud, P. P. In situ strain measurements during the formation of platinum silicide films / P. P. Buaud, F. M. d'Heurle, E. A. Irene, B. K. Patnaik, N. R. Parikh // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 1991. – Vol. 9. – iss. 5. – P. 2536-2541. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.585688>
45. Gergaud, P. Chenevier Stresses arising from a solid state reactions between palladium films and Si(001) investigated by in situ combined x-ray diffraction and curvature measurements / P. Gergaud, O. Thomas // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 94. – iss. 3. – P. 1584-1591. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1590059>
46. Abermann, R. Internal stress of vapour-deposited aluminium films: Effect of O₂ and water vapour present during film deposition / R. Abermann // *Thin Solid Films.* – 1990. – Vol. 186. – iss. 2. – P. 233-240. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(90\)90145-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(90)90145-4)
47. Murakami, M. Deformation in thin films by thermal strain / M. Murakami // *J. Vac. Sci. Techchnol.* – 1991. – Vol. 9. – iss. 4. – P. 2469-2476. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.577258>
48. Time dependence of stress and hillock distributions during electromigration in thin metal film interconnections / L. Klinger, E. Glickman, A. Katsman, L. Levin // *Mater. Sci. Eng. B.* – 1994. – Vol. 23. – iss. 1. – P. 15–18. DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-5107\(94\)90271-2](https://doi.org/10.1016/0921-5107(94)90271-2)
49. The influence of sputter-deposition parameters on piezoelectric and mechanical properties of AlN thin films / A. Ababneh, U. Schmid, J. Hernando, J. L. Sanchez-Rajas, H. Seidel // *Mater. Sci. Eng. B.* – 2010. – Vol. 172. – iss. 3. – P. 253-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.05.026>
50. Dutta, S. Ferroelectric and piezoelectric properties of (111) oriented lanthanum modified lead zirconate titanate film / S. Dutta, A. A. Jeyaseelan, S. Sruthi // *Thin Solid Films.* – 2014. – Vol. 562. – P. 190-194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.04.072>

51. Enhancement of piezoelectric response of diluted Ta doped AlN / H. Liu, F. Zeng, G. Tang, F. Pan // *Appl. Surf. Sci.* – 2013. – Vol. 270. – P. 225-230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.005>
52. Electrostriction: nonlinear electromechanical coupling in solid dielectrics / R. E. Newnham, V. Sundar, R. Yimnirun, J. Su, Q. M. Zhang // *J. Phys. Chem. B.* – 1997. – Vol. 101. – iss. 48. – P. 10141-10150. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp971522c>
53. Direct and inverse measurement of thin film magnetostriction / J.-Ph. Jay, F. Le Berre, S. P. Pogossian, M. V. Indenbom // *J. Magn. Mag. Mater.* – 2010. – Vol. 322. – iss. 15. – P. 2203-2214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.02.011>
54. Magnetostriction measurement in thin films using laser Doppler vibrometry / R. Varghese, R. Viswan, K. Joshi, S. Seifikar, Y. Zhou, J. Schwartz, S. Priya // *J. Magn. Mag. Mater.* – 2014. – Vol. 383. – P. 179-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.03.076>
55. Shintani, A. Temperature dependence of stresses in chemical vapor deposited vitreous films / A. Shintani, S. Sugaki, H. Nakashima // *J. Appl. Phys.* – 1980. – Vol. 51. – iss. 8. – P. 4197-4205. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.328277>
56. Lee, C.-C. Modeling and validation of mechanical stress in indium tin oxide layer integrated in highly flexible stacked thin films / C.-C. Lee // *Thin Solid Films.* – 2013. – Vol. 544. – P. 443-447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.02.084>
57. Mastering the biaxial stress state in nanometric thin films on flexible substrates / D. Faurie, P.-O. Renault, E. Le Bourhis, G. Geandier, P. Goudeau, D. Thiaudiere // *Appl. Surf. Sci.* – 2014. – Vol. 306. – P. 70-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.032>
58. Stoney, G. G. The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A.* – 1909. – Vol. 82. – iss. 553. – P. 172-175.
59. Janssen, G. Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers / G. Janssen, M. M. Abdalla, F. van Keulen, B. R. Pujada, B. van Venrooy // *Thin Solid Films.* – 2009. – Vol. 517. – iss. 6. – P. 1858-1867. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.07.014>
60. Shull, A. L. Measurements of stress during vapor deposition of copper and silver thin films and multilayers / A. L. Shull, F. Spaepen // *Journal of Applied Physics.* – 1996. – Vol. 80. – iss. 11. – P. 6243-6256. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.363701>
61. Pan, J. In situ stress measurement of refractory metal silicides during sintering / J. Pan, I. Blech // *Journal of Applied Physics.* – 1984. – Vol. 55. – iss. 8. – P. 2874-2880. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.333326>
62. Martinez, R. E. Direct measurement of crystal surface stress / R. E. Martinez, W. M. Augustyniak, J. A. Golovchenko // *Physical Review Letters.* – 1990. – Vol. 64. – iss. 9. – P. 1035-1038. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.1035>
63. Moske, M. New UHV dilatometer for precise measurement of internal stresses in thin binary-alloy films from 20 to 750 K / M. Moske, K. Samwer // *Review of Scientific Instruments.* – 1988. – Vol. 59. – iss. 9. – P. 2012-2017. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1140017>

64. Wilcock, J. A sensitive bending beam apparatus for measuring the stress in evaporated thin films / J. Wilcock, D. Campbell // *Thin Solid Films*. – 1969. – Vol. 3. – iss. 1. – P. 3-12. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(69\)90107-2](https://doi.org/10.1016/0040-6090(69)90107-2)
65. Yu, Y.-T. Evaluation of residual stresses in thin films by critical buckling observation of circular microstructures and finite element method / Y.-T. Yu, W.-Z. Yuan, D.-Y. Qiao, Q. Liang // *Thin Solid Films*. – 2008. – Vol. 516. – iss. 12. – P. 4070-4075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.12.153>
66. Blackburn, H. The development of stress and surface temperature during deposition of lithium fluoride films / H. Blackburn, D. Campbell // *Philosophical Magazine*. – 1963. – Vol. 8. – iss. 89. – P. 823-831. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786436308213839>
67. Story, H. Stress Annealing in Vacuum Deposited Copper Films / H. Story, R. Hoffman // *Proceedings of the Physical Society. Section B*. – 1957. – Vol. 70. – iss. 10. – P. 950.
68. Priest, J. Stress anisotropy in silicon oxide films / J. Priest, H. Caswell, Y. Budo // *Journal of Applied Physics*. – 1963. – Vol. 34. – iss. 2. – P. 347-351. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1702611>
69. Priest, J. R. Apparatus for the Measurement of Stress in Vacuum Evaporated Films / J. R. Priest // *Review of Scientific Instruments*. – 1961. – Vol. 32. – iss. 12. – P. 1349-1351. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1717249>
70. Prevey, P. S. X-ray diffraction residual stress techniques / P. S. Prevéy, D. J. Hornbach. – ASM International, ASM Handbook. – 1986. – Vol. 10. – P. 380-392. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v10.a0006632>

References

1. Mechanical behavior of metallic thin films on polymeric substrates and the effect of ion beam assistance on crack propagation / M. George, C. Coupeau, J. Colin, J. Grilhé // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53. – iss. 2. – P. 411-417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.09.036>
2. The influence of a brittle Cr interlayer on the deformation behavior of thin Cu films on flexible substrates: Experiment and model / V. M. Marxab, F. Tothc, A. Wiesinger, J. Berger, Ch. Kirchlechner, M. J. Cordill, F. D. Fischer, F. G. Rammerstorfer, G. Dehma // *Acta Materialia*. – 2015. – Vol. 89. – P. 278-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.01.047>
3. Atomic force microscopy study of the morphological shape of thin film buckling / C. Coupeau // *Thin Solid Films*. – 2002. – Vol. 406, – iss. 1-2. – P. 190-194. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01772-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01772-2)
4. An experimental study of the influence of imperfections on the buckling of compressed thin films / M.-W. Moon, J.-W. Chung, K.-R. Lee, K. H. Oh, R. Wang, A. G. Evans // *Acta Materialia*. – 2002. – Vol. 50. – iss. 5. – P. 1219-1227. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00423-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00423-2)
5. How soft substrates affect the buckling delamination of thin films through crack front sink-in / R. Boijoux, G. Parry, J.-Y. Faou, C. Coupeau // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 110. – iss. 14. – P. 141602. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4979614>
6. From telephone cords to branched buckles: A phase diagram / J.-Y. Faou, S. Grachev, E. Barthel, G. Parry // *Acta Materialia*. – 2017. – Vol. 125. – P. 524-531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.025>

7. Enhanced Proton Conductivity in Y-Doped BaZrO₃ via Strain Engineering / A. Fluri, A. Marcolongo, V. Roddatis, A. Wokaun, D. Pergolesi, N. Marzari, T. Lippert // *Advanced Science*. – 2017. – Vol. 4. – iss. 12. – P. 1700467. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201700467>
8. Growth stress induced tunability of dielectric permittivity in thin films / K. V. L. V. Narayanachari, H. Chandrasekar, A. Banerjee, K. B. R. Varma, R. Ranjan, N. Bhat, S. Raghavan // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – Vol. 119. – iss. 1. – P. 014106. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4939466>
9. Sander, D. The correlation between mechanical stress and magnetic anisotropy in ultrathin films / D. Sander // *Reports on Progress in Physics*. – 1999. – Vol. 62. – iss. 5. – P. 809-858.
10. Sander, D. The role of surface stress in structural transitions, epitaxial growth and magnetism on the nanoscale / D. Sander, Z. Tian, J. Kirschner // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2009. – Vol. 21, iss. 13. – P. 134015. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/13/134015>
11. Lee, M. L. Strained Si, SiGe, and Ge channels for high-mobility metal-oxide-semiconductor field-effect transistors / M. L. Lee, E. A. Fitzgerald // *Journal of Applied Physics*. – 2005. – Vol. 95. – iss. 1. – P. 011101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1819976>
12. Vertical Graphene Growth on SiO Microparticles for Stable Lithium Ion Battery Anodes / L. Shi, C. Pang, S. Chen, M. Wang, K. Wang, Z. Tan, P. Gao, J. Ren, Y. Huang, H. Peng, Z. Liu // *Nano Letters*. – 2017. – Vol. 17. – iss. 6. – P. 3681-3687. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00906>
13. Growing vertical graphene sheets on natural graphite for fast charging lithium-ion batteries / Y. Mu, M. Han, J. Li, J. Liang, J. Yu // *Carbon*. – 2021. – Vol. 173. – P. 477-484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.027>
14. Vertically-oriented graphene nanowalls: Growth and application in Li-ion batteries / Q. Yang, J. Wu, S. Li, L. Zhang, J. Fu, F. Huang, Q. Cheng // *Diamond and Related Materials*. – 2019. – Vol. 91. – P. 54-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.11.007>
15. Zhang, Z. Vertically Aligned Graphene Nanosheet Arrays: Synthesis, Properties and Applications in Electrochemical Energy Conversion and Storage / Z. Zhang, C.-S. Lee, W. Zhang // *Advanced Energy Materials*. – 2017. – Vol. 7. – iss. 23. – P. 1700678. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201700678>
16. Facile growth of vertically-aligned graphene nanosheets via thermal CVD: The experimental and theoretical investigations / H. Wang, E. Gao, P. Liu, D. Zhou, D. Geng, X. Xue, L. Wang, K. Jiang, Z. Xu, G. Yu // *Carbon*. – 2017. – Vol. 121. – P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.05.074>
17. Study of CuO Nanowire Growth on Different Copper Surfaces / G. Fritz-Popovski, F. Sosada-Ludwikowska, A. Köck, J. Keckes, G. A. Maier // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37172-8>
18. Cu₂O/CuO heterojunction catalysts through atmospheric pressure plasma induced defect passivation / Avishek Dey, Gauthaman Chandrabose, A. Lois, O. Dampney, E.S. Erakulan, R. Thapa, S. Zhuk, G. K. Dalapati, S. Ramakrishna, N. St. J. Braithwaite, A. Shirzadi, S. Krishnamurthy // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 541. – P. 148571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148571>
19. Macroscale synthesis of CuO nanowires on FTO plane substrate / Y. Mabuchi, R. N. Mohamed, X. Li, J. Liang, N. Kishi, T. Soga // *Modern Physics*

Letters B. – 2019. – Vol. 33. – iss. 11. – P. 1950138. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0217984919501380>

20. Adsorption of H₂, CO₂, CH₄, CO, N₂ and H₂O in activated Carbon and Zeolite for Hydrogen production / F. V. S. Lopes, C. A. Grande, A. M. Ribeiro, J. M. Loureiro, O. Evaggelos, V. Nikolakis, A. E. Rodrigues // Separation Science and Technology. – 2009. – Vol. 44. – P. 1045-1073. DOI: <https://doi.org/10.1080/01496390902729130>

21. Adsorption of CO₂, CH₄, and N₂ in Activated Carbon Honeycomb Monolith / R. P. Ribeiro, T. P. Sauer, F. V. Lopes, R. F. Moreira, C. A. Grande, A. E. Rodrigues // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2008. – Vol. 53. – P. 2311-2317. DOI: <https://doi.org/10.1021/je800161m>

22. Baranov, O. Towards a highly-controllable synthesis of copper oxide nanowires in radio-frequency reactive plasma: fast saturation at the targeted size / O. Baranov, G. Filipič, U. Cvelbar // Plasma Sources Science and Technology. – 2019. – № 28. – P. 084002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aae12e>

23. Baranov, O. O. Teoretična model' formuvannâ odnovimîrnih nanostruktur oksidu mîdi v umovah plazmovogo seredoviša / O. O. Baranov // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : Nacional'nij aerokosmičnij unîversitet îm. M. Ê. Žukovs'kogo «Harkîvs'kij aviaciînij îstitut». – Harkîv, 2020. – № 88. – S. 141 – 161. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2020.88.11>

24. Teixeira, V. Residual stress and cracking in thin PVD coatings / V. Teixeira // Vacuum. – 2002. – Vol. 64. – iss. 3-4. – P. 393-399. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00327-X](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00327-X)

25. Thornton, J.A. Stress-related effects in thin films / J.A. Thornton, D. Hoffman // Thin Solid Films. – 1989. – Vol. 171. – iss. 1. – P. 5-31. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(89\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(89)90030-8)

26. Hunt, R. A model of deadherence due to stresses in an elastic film / R. Hunt, B. Gale // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1972. – Vol. 5. – iss. 2. – P. 359-372. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/5/2/318>

27. Finegan, J., Hoffman, R. AEC Technical Report No. 18 / J. Finegan, R. Hoffman. – Case Institute of Technology, Cleveland, 1961 – 34 p.

28. Rottmayer, R. E. Solid state physics program. Growth effects thin nickel films: Technical Report No. 79 / R. E. Rottmayer. – Case Western Reserve Univ., Cleveland, Ohio., 1972. – 78 p.

29. Koch, R. Microstructural changes in vapour-deposited silver, copper and gold films investigated by internal stress measurements / R. Koch, R. Abermann // Thin Solid Films. – 1986. – Vol. 140. – iss. 2. – P. 217-226. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(86\)90265-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(86)90265-8)

30. Chaudhari, P. Grain growth and stress relief in thin films / P Chaudhari // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1972. – Vol. 9. – iss. 1. – P. 520-522. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.1316674>

31. Doerner, M. F., Nix, W.D. Stresses and deformation processes in thin films on substrates / M. F. Doerner, W. D. Nix // Critical Reviews in Solid State and Material Sciences. – 1988. – Vol. 14. – iss. 3. – P. 225-268. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408438808243734>

32. D'Heurle, F. M. Aluminum films deposited by rf sputtering / F. M. D'Heurle // Metall. Trans. – 1970. – Vol. 1. – iss. 3. – P. 725-732. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02811600>

33. Windischmann, H. An intrinsic stress scaling law for polycrystalline thin films prepared by ion beam sputtering / H. Windischmann // *J. Appl. Phys.* – 1987. – Vol. 62. – iss. 5. – P. 1800-1807. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.339560>
34. Abermann, R., Koch, R. In situ study of thin film growth by internal stress measurement under ultrahigh vacuum conditions: Silver and copper under the influence of oxygen / R. Abermann, R. Koch // *Thin Solid Films.* – 1986. – Vol. 142. – iss 1. – P. 65-76.
35. Sigmund, P. Sputtering by ion bombardment theoretical concepts. In: Behrisch R. (eds) *Sputtering by Particle Bombardment I. Topics in Applied Physics.* – Springer, Berlin, Heidelberg. - 1981. – Vol. 47.– P. 9-71. DOI: https://doi.org/10.1007/3540105212_7
36. Effect of ion bombardment during deposition on the x-ray microstructure of thin silver films / T. C. Huang, G. Lim, F. Parmigiani, E. Kay // *Journal of Vacuum Science & Technology A.* – 1985. – Vol. 3. – iss. 6. – P. 2161-2166. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.573271>
37. Kay, E. Effect of energetic neutralized noble gas ions on the structure of ion beam sputtered thin metal films / E. Kay, F. Parmigiani, W. Parrish // *Journal of Vacuum Science & Technology A.* – 1987. – Vol. 5. – iss. 1. – P. 44-51. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.574135>
38. Windischmann, H. Intrinsic stress in sputter-deposited thin films // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* – 1992. – Vol. 17. – iss. 6. – P. 547-596. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408439208244586>
39. On the origin of stress in magnetron sputtered TiN layers / J.-D. Kamminga, Th. H. de Keijser, R. Delhez, E. J Mittemeijer // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 88. – iss. 11. – P. 6332-6345. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1319973>
40. Abadias, G. Diffraction stress analysis in fiber-textured TiN films grown by io-beam sputtering: Application to (001) and mixed (001)+(111) texture / G. Abadias, Y. Y. Tse // *J. App. Phys.* – 2004. – Vol. 95. – iss. 5. – P. 2414-2428. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1646444>
41. Stress field in sputtered thin films: Ion irradiation as a tool to induce relaxation and investigate the origin of growth stress / A. Debelle, G. Abadias, A. Michel, C. Jaouen // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 84. – iss. 24. – P. 5034-5036. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1763637>
42. Doerner, M. F. Stresses and deformation processes in thin films on substrates / M. F. Doerner, W. D. Nix // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* – 1988. – Vol. 14. – iss. 3. – P. 225- 268. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408438808243734>
43. White, G. E. In situ study of film stresses in metal silicides using absorption-edge-contour mapping / G. E. White, H. Chen // *J. Appl. Phys.* – 1990. – Vol. 68. –iss. 7. – P. 3317-3321. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.346384>
44. Buaud, P. P. In situ strain measurements during the formation of platinum silicide films / P. P. Buaud, F. M. d'Heurle, E. A. Irene, B. K. Patnaik, N. R. Parikh // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 1991. – Vol. 9. – iss. 5. – P. 2536-2541. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.585688>
45. Gergaud, P. Chenevier Stresses arising from a solid state reactions between palladium films and Si(001) investigated by in situ combined x-ray diffraction and curvature measurements / P. Gergaud, O. Thomas // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 94. – iss. 3. – P. 1584-1591. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1590059>
46. Abermann, R. Internal stress of vapour-deposited aluminium films: Effect of O₂ and water vapour present during film deposition / R. Abermann // *Thin Solid*

Films. – 1990. – Vol. 186. – iss. 2. – P. 233-240. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(90\)90145-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(90)90145-4)

47. Murakami, M. Deformation in thin films by thermal strain / M. Murakami // J. Vac. Sci. Technol. – 1991. – Vol. 9. – iss. 4. – P. 2469-2476. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.577258>

48. Time dependence of stress and hillock distributions during electromigration in thin metal film interconnections / L. Klinger, E. Glickman, A. Katsman, L. Levin // Mater. Sci. Eng. B. – 1994. – Vol. 23. – iss. 1. – P. 15–18. DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-5107\(94\)90271-2](https://doi.org/10.1016/0921-5107(94)90271-2)

49. The influence of sputter-deposition parameters on piezoelectric and mechanical properties of AlN thin films / A. Ababneh, U. Schmid, J. Hernando, J. L. Sanchez-Rajas, H. Seidel // Mater. Sci. Eng. B. – 2010. – Vol. 172. – iss. 3. – P. 253-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.05.026>

50. Dutta, S. Ferroelectric and piezoelectric properties of (111) oriented lanthanum modified lead zirconate titanate film / S. Dutta, A. A. Jeyaseelan, S. Sruthi // Thin Solid Films. – 2014. – Vol. 562. – P. 190-194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.04.072>

51. Enhancement of piezoelectric response of diluted Ta doped AlN / H. Liu, F. Zeng, G. Tang, F. Pan // Appl. Surf. Sci. – 2013. – Vol. 270. – P. 225-230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.005>

52. Electrostriction: nonlinear electromechanical coupling in solid dielectrics / R. E. Newnham, V. Sundar, R. Yimnirun, J. Su, Q. M. Zhang // J. Phys. Chem. B. – 1997. – Vol. 101. – iss. 48. – P. 10141-10150. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp971522c>

53. Direct and inverse measurement of thin film magnetostriction / J.-Ph. Jay, F. Le Berre, S. P. Pogossian, M. V. Indenbom // J. Magn. Mag. Mater. – 2010. – Vol. 322. – iss. 15. – P. 2203-2214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.02.011>

54. Magnetostriction measurement in thin films using laser Doppler vibrometry / R. Varghese, R. Viswan, K. Joshi, S. Seifikar, Y. Zhou, J. Schwartz, S. Priya // J. Magn. Mag. Mater. – 2014. – Vol. 383. – P. 179-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.03.076>

55. Shintani, A. Temperature dependence of stresses in chemical vapor deposited vitreous films / A. Shintani, S. Sugaki, H. Nakashima // J. Appl. Phys. – 1980. – Vol. 51. – iss. 8. – P. 4197-4205. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.328277>

56. Lee, C.-C. Modeling and validation of mechanical stress in indium tin oxide layer integrated in highly flexible stacked thin films / C.-C. Lee // Thin Solid Films. – 2013. – Vol. 544. – P. 443-447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.02.084>

57. Mastering the biaxial stress state in nanometric thin films on flexible substrates / D. Faurie, P.-O. Renault, E. Le Bourhis, G. Geandier, P. Goudeau, D. Thiaudiere // Appl. Surf. Sci. – 2014. – Vol. 306. – P. 70-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.032>

58. Stoney, G. G. The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1909. – Vol. 82. – iss. 553. – P. 172-175.

59. Janssen, G. Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers / G. Janssen, M. M. Abdalla, F. van Keulen, B. R. Pujada, B. van Venrooy // Thin Solid Films. – 2009. – Vol. 517. – iss. 6. – P. 1858-1867. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.07.014>

60. Shull, A. L. Measurements of stress during vapor deposition of copper and silver thin films and multilayers / A. L. Shull, F. Spaepen // *Journal of Applied Physics*. – 1996. – Vol. 80. – iss. 11. – P. 6243-6256. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.363701>

61. Pan, J. Insitu stress measurement of refractory metal silicides during sintering / J. Pan, I. Blech // *Journal of Applied Physics*. – 1984. – Vol. 55. – iss. 8. – P. 2874-2880. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.333326>

62. Martinez, R. E. Direct measurement of crystal surface stress / R. E. Martinez, W. M. Augustyniak, J. A. Golovchenko // *Physical Review Letters*. – 1990. – Vol. 64. – iss. 9. – P. 1035-1038. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.1035>

63. Moske, M. New UHV dilatometer for precise measurement of internal stresses in thin binary-alloy films from 20 to 750 K / M. Moske, K. Samwer // *Review of Scientific Instruments*. – 1988. – Vol. 59. – iss. 9. – P. 2012-2017. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1140017>

64. Wilcock, J. A sensitive bending beam apparatus for measuring the stress in evaporated thin films / J. Wilcock, D. Campbell // *Thin Solid Films*. – 1969. – Vol. 3. – iss. 1. – P. 3-12. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(69\)90107-2](https://doi.org/10.1016/0040-6090(69)90107-2)

65. Yu, Y.-T. Evaluation of residual stresses in thin films by critical buckling observation of circular microstructures and finite element method / Y.-T. Yu, W.-Z. Yuan, D.-Y. Qiao, Q. Liang // *Thin Solid Films*. – 2008. – Vol. 516. – iss. 12. – P. 4070-4075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.12.153>

66. Blackburn, H. The development of stress and surface temperature during deposition of lithium fluoride films / H. Blackburn, D. Campbell // *Philosophical Magazine*. – 1963. – Vol. 8. – iss. 89. – P. 823-831. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786436308213839>

67. Story, H. Stress Annealing in Vacuum Deposited Copper Films / H. Story, R. Hoffman // *Proceedings of the Physical Society. Section B*. – 1957. – Vol. 70. – iss. 10. – P. 950.

68. Priest, J. Stress anisotropy in silicon oxide films / J. Priest, H. Caswell, Y. Budo // *Journal of Applied Physics*. – 1963. – Vol. 34. – iss. 2. – P. 347-351. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1702611>

69. Priest, J. R. Apparatus for the Measurement of Stress in Vacuum Evaporated Films / J. R. Priest // *Review of Scientific Instruments*. – 1961. – Vol. 32. – iss. 12. – P. 1349-1351. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1717249>

70. Prevey, P. S. X-ray diffraction residual stress techniques / P. S. Prevéy, D. J. Hornbach. – ASM International, *ASM Handbook*. – 1986. – Vol. 10. – P. 380-392. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v10.a0006632>

Надійшла до редакції 20.04.2021, розглянута на редколегії 20.04.2021

Analysis of existing models of stress in thin films and coatings

The analysis of existing models of stress in thin films and coatings was carried out. While reaching critical value, stress can lead to defects, cracks, delamination of coating from substrate, etc. The task of prediction and controlling of the direction and magnitude of the stress of coating-substrate system is relevant nowadays regardless of coating and thin films deposition methods. Different types of coatings and thin films are widely used in almost all industries: optics, mechanical engineering, measuring

technology, medicine, micro- and nanoelectronics, etc. Development and investigation of new promising methods for the formation of nanostructures, such as nanowires in a plasma environment, requires a sufficient theoretical basis for the origin and growing of stresses. Depending on the mechanism, the causes of stress in thin films and coatings can be: chemical reactions, phase transformations, inclusions and impurities, particle bombardment (the cause of internal stress during coating growing); temperature changes (the cause of thermal stress due to different values of coefficients of thermal expansion of coating and substrate materials); deformation of coating-substrate system, etc. Models of stress development in coatings and thin films can be divided into the following groups: stress that occur at the coating-substrate interface, internal coating stress, and stress at the coating-environment interface. The study presents methods of stress measuring in thin films and coatings. Based on the results of the current research, it can be concluded that the existing models of stress in the process of growth of coatings and films, as well as stress arising under the action of external forces, describe only the causes of the stress and unfortunately do not give an understanding of their complex effect on stress-strain state of coating-substrate system and need further development and improvement. Stress relaxation is also important to obtain new structures and certain properties of coatings. The development of stress management tools can be considered as one of the ways to increase the lifetime of products with coatings and thin films.

Keywords: stress-strain state, stress, nanotechnology, thin films and coatings, destruction of coatings

Відомості про автора:

Шорінов Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; o.shorinov@khai.edu; ResearchGate: Oleksandr-Shorinov; ORCID: 0000-0002-5057-6679

About the Author:

Shorinov Oleksandr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Aircraft Engine Manufacturing Technology, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; o.shorinov@khai.edu; ResearchGate: Oleksandr-Shorinov; ORCID: 0000-0002-5057-6679