

Механотермодифузійні процеси в частково прозорих деформівних твердих тілах з домішками при електромагнітному опроміненні за світлового діапазону частот

Олександр Гачкевич¹, Ростислав Терлецький²

¹ д. ф.-м. н., професор, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, e-mail: dept13@iapmm.lviv.ua

² д. ф.-м. н., с. н. с., Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, e-mail: dept13@iapmm.lviv.ua

З використанням континуальної моделі твердої суміші домінантної компоненти (каркаса) та домішок і феноменологічної теорії випромінювання приведено результати математичного моделювання і дослідження процесів перенесення тепла та маси і деформування в частково прозорих тілах з домішками за умов дії теплового та лазерного випромінювання. Враховано відоме явище «фотостимульованої дифузії». Встановлено нові закономірності в розподілах компонент тензора напружень, температури і концентрацій газових домішок у шарі залежно від їх кількості й типу, енергетичних і спектральних характеристик джерела випромінювання, умов тепло- й масообміну з зовнішнім середовищем.

Ключові слова: механотермодифузійні процеси, багатокомпонентні частково прозорі тіла, лазерне та теплове випромінювання.

Вступ. Електромагнітне випромінювання (ЕМВ) світлового частотного діапазону (що включає інфрачервоне випромінювання ($3 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{14}$ Гц), видиме світло ($3 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{15}$ Гц) та ультрафіолетове випромінювання ($3 \cdot 10^{15} \div 3 \cdot 10^{17}$ Гц)) широко використовують у сучасних технологіях обробки елементів конструкцій та приладів, виготовлених зі скла, пластмас, кераміки й інших неметалевих матеріалів, які є частково прозорими в цьому діапазоні частот [1-5]. Використання згаданого випромінювання з метою інтенсифікації дифузійних процесів (при нанесенні зміцнюючих покриттів, сушінні, дегазуванні, легуванні і т. п.) пов'язано з пришвидшенням дифузійних процесів у неметалевих тілах під дією ЕМВ світлового діапазону і відоме в літературі під назвою «фотостимульована дифузія» [6]. Для цього явища характерним є безпосередній вплив випромінювання на прискорення дифузійних процесів через збільшення енергії дифундуючих частинок (атомів чи молекул) внаслідок поглинання ними енергії випромінювання у певних діапазонах спектра, що належать саме світловій області. Дослідженню «фотостимульованої дифузії» в діелектриках та напівпровідниках присвячені роботи [7-10]. У [8, 9] теоретично встановлено, що у разі достатньо високих інтенсивностей випромінювання можна очікувати зростання коефіцієнта дифузії на кілька порядків. Суттєве

пришвидження дифузії газових домішок у склі внаслідок теплового інфрачервоного опромінення виявлено експериментально при дослідженні режимів дегазування скляних елементів електровакуумних приладів з допомогою такого випромінювання [11, 12]. Необхідність вибору раціональних режимів обробок з допомогою ЕМВ світлового частотного діапазону зумовлює потребу розробки розрахункових термодинамічно обґрунтованих математичних моделей, що описують взаємопов'язані (викликані дією випромінювання) процеси перенесення маси, тепла й деформування (механотермодифузійні процеси) у твердих тілах з частково прозорих матеріалів з домішками (багатокомпонентних тілах) із врахуванням особливостей масоперенесення, зумовлених глибинним характером введення електромагнітної енергії і відмінністю поглинальних властивостей компонент.

У літературі відомі математичні моделі кількісного опису термомеханічної поведінки електропровідних тіл, що можуть поляризуватися та намагнічуватися, за умов дії квазіусталених та нестационарних електромагнітних полів (ЕМП) радіочастотного діапазону (до $3 \cdot 10^{11}$ Гц) [13-18 та ін.]. У цих моделях приймається, що електромагнітне поле щодо тіла є зовнішньою дією, вплив якої на процеси теплопровідності та деформації враховується через тепловиділення і пондеромоторні сили. Вихідні співвідношення в цих моделях формулюються у два етапи. На першому етапі записуються задачі на визначення характеристик ЕМП, а також відповідні вирази для тепловиділень і пондеромоторних сил через ці характеристики. На другому формулюються задачі динамічної термопружності, в яких джерелами тепла й об'ємними силами є знайдені на першому етапі тепловиділення та пондеромоторні сили. Результати досліджень, виконаних на основі такого модельного підходу, докладно викладені в оглядах [19-21].

Виходячи з наближення геометричної оптики та феноменологічної теорії випромінювання, на основі єдиного підходу до означення чинників дії ЕМВ на тіло в радіо- та світловому частотних діапазонах запропоновано варіант теорії, узагальнений на випадок, коли частоти ЕМВ належать до світлового діапазону [15, 22, 23]. У ньому враховано специфіку опису поширення в тілі ЕМВ згаданого діапазону та чинників його дії (об'ємних тепловиділень і пондеромоторних (механічних) сил) на тіло. Здійснено постановку низки нових термомеханічних задач, які мають практичне застосування при визначенні раціональних режимів термообробки тіл із використанням теплового випромінювання [24-26].

Зазначимо, що у науковій літературі [27-29 та ін.] відомі дослідження щодо визначення пружно-деформованого стану тіл у разі дії концентрованих потоків енергії (лазерне випромінювання) і теплового опромінення. У згаданих працях дію випромінювання враховують через теплові потоки чи джерела тепла при заданому їх локальному розподілі, а також узагальнені умови теплообміну з зовнішнім середовищем.

Дослідження електромагнітних, теплових, механічних процесів у взаємозв'язку з процесами перенесення маси в деформівних твердих тілах історично спричинено потребами електронної техніки, зокрема пов'язаними зі створенням нових електротехнічних матеріалів (діелектричних, електропровідних, напівпровідникових), а також необхідністю прогнозування електричних, магнітних, теплових та

механічних властивостей таких реальних тіл, що містять чужорідні домішки, та їх термомеханічної поведінки в умовах комплексних навантажень (механічних, теплових, дифузійних та електромагнітних). Відповідні моделі механотермодифузії згаданих типів тіл будувалися на основі термомеханіки сумішей [30-34 й ін.] і теорій електромеханічної взаємодії, описаних у [35, 36]. Так, у роботах Я. С. Підстригача, Я. Й. Бурака та їх учнів [37, 38] розроблено модель n -компонентного електропровідного твердого розчину заряджених домішкових компонент. Така модель є узагальненням деформаційної моделі електропровідного неферомагнітного (нехтуючи поляризаційними процесами) тіла [39, 40]. У ній тіло розглядається як суміш n електрично заряджених компонент (позитивно зарядженої ґратки основного металу, електронів провідності та $n - 2$ видів іонів розчиненої домішкової речовини). Перенесення маси у розглядуваному розчині (нехтуючи перенесенням маси електронами) за припущення локальної теплової рівноваги між компонентами описувалося з допомогою скалярних хімічних потенціалів домішкових компонент і пов'язувалося з наявною неоднорідністю розподілу досліджуваних полів концентрацій домішкових компонент (фіківська дифузія) в тілі, температури (термодифузія), деформацій (механодифузія), термодинамічного електричного потенціалу (що характеризує просторову неоднорідність енергетичного стану електронів) та силовою дією ЕМП на заряджені домішкові компоненти (реактивна дифузія). Безпосередній вплив масоперенесення на напружений стан у тілі пов'язувався з концентраційними напруженнями внаслідок нерівномірного розподілу розчиненої речовини. Узагальнення описаної моделі на випадок можливої зміни стану домішкових компонент (різних шляхів дифузії) здійснено в роботах [41, 42]. Термодинамічні моделі електропровідних сумішей (як рідких, так і твердих), що розглядають взаємозв'язок механічних, теплових та дифузійних процесів разом з електромагнітними, на базі дифузійного наближення [31] запропоновані в роботах [43-45]. Специфіка впливу ЕМП на масоперенесення у суміші в цих моделях враховувалася через явища реактивної дифузії іонних компонент.

Термодинамічні моделі (з використанням підходів раціональної термодинаміки [46, 47]) електромеханічної взаємодії в деформівному напівпровідному тілі з п'єзо ефектом, з використанням варіанта теорії сумішей з домінуючою компонентою [45, 48], розроблені в роботах [49, 50]. У них тіло розглядається як суміш поляризованої основної діелектричної матриці (домінуючої компоненти) та n заряджених компонент, що можуть утворюватися в тілі. Перерозподіл заряду в тілі у цих моделях (при нехтуванні магнітними ефектами) визначається як процесами генерації носіїв заряду і процесами електронної провідності, так і дифузійним рухом іонних компонент в основній матриці (іонною провідністю).

У літературі для опису взаємозв'язаних механотермодифузійних процесів у деформівному електропровідному неферомагнітному тілі з електронейтральними домішками, що знаходиться в ЕМП, пропонувалися також розрахункові моделі, які будувалися як узагальнення відомих моделей механотермодифузії. У них вплив поля на процеси масоперенесення враховувався зумовленими дією поля розподілами деформацій і температури в тілі (механо- і термодифузійними явищами). Так, у роботі [51] дослідження впливу сильного постійного магнітного поля

(що спричинює стан магнітного насичення) на процес дифузії та термодифузії газової домішки в діа- чи парамагнетиках проводилося на основі моделі термодифузії, запропонованої W. Nowacki [52] і моделі магнітотермопружності, розвинутої Н. Parkus [53]. У роботі [54], присвяченій дослідженню впливу індукційного нагрівання на дифузію електронейтрального розплаву в електропровідному тілі та його напружений стан, розрахункова модель будувалася на основі запропонованої в роботах Я. С. Підстригача [55, 56] моделі двокомпонентного твердого розчину та розвинутого в [46] варіанта термомеханіки електропровідних тіл.

Ще одне узагальнення моделей термодифузії на випадок парамагнітних тіл із домішками запропоновано в працях В. Maguszewski [57, 58]. У згаданих працях враховано вплив магнітних властивостей тіла на процеси перенесення маси (моделі магнітотермодифузії) через залежність енергетичних характеристик домішок (хімічних потенціалів) від параметрів магнітного поля в тілі.

Таким чином, у згаданих моделях механотермодифузії деформівних багатокомпонентних твердих тіл за умов дії ЕМВ радіочастотного діапазону перенесення маси пов'язувалося з дифузією електронейтральних компонент внаслідок неоднорідного розподілу концентрацій, температури, деформацій і напруженостей електричного чи магнітного полів у тілі, а також з дифузією заряджених (іонних) компонент під впливом сил ЕМП. Вплив масоперенесення на напружений стан таких тіл враховувався через концентраційні напруження, спричинені відносною зміною об'єму тіла разом зі зміною концентрацій дифундуючих компонент. Особливості масоперенесення, зумовлені глибинним характером введення електромагнітної енергії в багатокомпонентні тіла та відмінністю поляризаційних та магнітних властивостей складових компонент, у згаданих моделях не досліджувалися. Термодинамічно обґрунтовані моделі механотермодифузії багатокомпонентних деформівних твердих тіл, що взаємодіють із ЕМВ світлового діапазону (як тепловим, так і нетепловим), у літературі відсутні.

У даній роботі викладено результати досліджень щодо моделювання механотермодифузійних процесів у багатокомпонентних твердих тілах із частково прозорих матеріалів за умов дії ЕМВ світлового діапазону, виконаних у Львівській школі з електромагнітотермомеханіки, започаткованій Я. С. Підстригачем і Я. Й. Бураком.

1. Математична модель механотермодифузії

В окремих дослідженнях масоперенесення домішок у тілах, як непрозорих, так і в частково прозорих для світлового випромінювання [59], вивчали на основі класичних співвідношень термодифузії, в яких вплив випромінювання враховували через розподіли температур, знайдені з розв'язку задачі перенесення тепла та випромінювання в тілі (радіаційно-кондуктивного теплообміну). При цьому, вплив концентрацій домішок на поле випромінювання в тілі та специфіка поглинання випромінювання окремими компонентами не розглядалися.

У роботах [60-66] на основі феноменологічної теорії випромінювання [67, 68] та континуальної моделі твердої суміші (твердого розчину), зокрема, з

домінантною компонентою, запропоновано математичну модель кількісного опису зумовлених дією зовнішнього теплового інфрачервоного випромінювання механотермодифузійних процесів у частково прозорих деформівних твердих тілах із домішками. Тіло розглядається як гомогенна тверда суміш деформівної матриці (каркаса) і дифундуючих у ньому домішкових компонент (дифузантив). Вплив випромінювання на досліджувані в тілі процеси враховується через тепловідлення внаслідок поглинання енергії випромінювання компонентами тіла (каркасом і домішками) і пондеромоторні сили дії випромінювання на них [5, 22, 60], які розглядаються в континуальній моделі, як об'ємні джерела тепла та сили. При моделюванні термомеханічної поведінки таких тіл, спричиненої дією світлового випромінювання, важливим є врахування (за об'ємного характеру введення енергії ЕМВ у тіла) відмінності поглинальних властивостей складових компонент, а також специфіки опису поширення випромінювання в них. У моделі враховано, що внаслідок відмінності поглинальних характеристик складових компонент досліджуваного багатокомпонентного тіла та чинників дії випромінювання на компоненти (густин поглинутих енергій та масових сил) у деяких підобластях тіла (в локальних об'ємах із фізично малих макрочастин) при встановленні теплової рівноваги протікають нерівноважні процеси обміну енергією між каркасом і домішками. За малих концентрацій домішкових компонент тіло розглянуто в наближенні слабкого твердого розчину (СТР) [45, 64]. Для опису локально нерівноважних станів у фізично малих елементах СТР (при спричиненій дією ЕМВ неоднорідності енергетичного стану компонент) використано підходи нерівноважної (раціональної) термодинаміки континууму. Другий закон термодинаміки сформульовано у формі нерівності Клаузіуса-Дюгема.

Для опису енергетичного стану дифузантив у СТР (малі масові концентрації $c_k = \rho_k / \rho_L \ll 1$ домішкових компонент, де ρ_k, ρ_L — густини домішок і каркаса) використовують рівняння балансу їх внутрішніх енергій, які для СТР наближено записують у вигляді [45]

$$\frac{dU_k}{dt} = \psi_k + U_{(kL)} + \dot{x}_i^{(L)} g_i^{(kL)}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Тут $\dot{x}_i^{(L)}$ — швидкість матеріальних точок каркаса; t — час; N — кількість дифузантив; $U_k, \psi_k, U_{(kL)}, g_i^{(kL)}$ — відповідно густини (з розрахунку на одиницю маси дифузантив) внутрішніх енергій, притоків енергії до них внаслідок поглинання випромінювання, енергій та імпульсів, отримуваних при взаємодії k -го дифузанта з каркасом. Як і для твердого тіла [46], внутрішні енергії дифузантив (у розрахунку на моль) подаємо у вигляді суми їх теплових енергій E_k й енергій $E_c^{(k)}$ зв'язку з каркасом, тобто

$$\rho_k V_k U_k = E_k + E_c^{(k)}, \quad \rho_k V_k = M_k, \quad (2)$$

де V_k, M_k — молярний об'єм і молярна маса k -го дифузанта. Якщо прийняти, що зміна в часі енергії зв'язку $E_c^{(k)}$ домішкової компоненти в розглядуваному СТР зумовлена обміном імпульсом із каркасом, то з (1) випливають такі рівняння балансу теплових енергій домішкових компонент

$$\frac{1}{M_k} \frac{dE_k}{dt} = \psi_k + U_{(kL)}. \quad (3)$$

Тепловій енергії моля k -го дифузанта можна поставити у відповідність теплову енергію моля однорідно нагрітого ідеального газу [46] з температурою T_k^{eq} . Тоді

$$E_k = \frac{3}{2} RT_k^{eq}, \quad E_k^{eq} = RT_k^{eq} \quad (4)$$

і рівняння (3) запишеться

$$\frac{3}{2M_k} \frac{dE_k^{eq}}{dt} = \psi_k + U_{(kL)}. \quad (5)$$

У співвідношеннях (4) R — універсальна газова стала. При цьому величина T_k^{eq} має зміст ефективної температури дифузанта.

Базуючись на моделюванні поширення випромінювання в тілі фотонами, теплових коливань каркаса — фононами, а енергообміну домішки з випромінюванням і каркасом — зіткненнями відповідно з фотонами та фононами, в роботах [62, 63, 65, 70] запропоновано методику наближеного визначення енергії E_k^{eq} .

Вирази для чинників дії випромінювання на окремі компоненти СТР (величини поглинутих енергій ψ_k і густини пондеромоторних сил \vec{f}_k дії випромінювання на окремі компоненти) отримано, виходячи з відомого для $c_k \ll 1$ подання спектрального коефіцієнта поглинання a_λ (λ — довжина хвилі) розчину у вигляді суми складових [60]

$$a_\lambda = a_\lambda^{(L)} + \sum_{k=1}^N a_\lambda^{(k)}(c_k), \quad (6)$$

які характеризують поглинання випромінювання каркасом і домішками, і виразів для об'ємної густини сумарних тепловиділень і пондеромоторних сил у суміші (які отримуються на основі рівняння перенесення випромінювання [22, 68]). При цьому, з урахуванням специфіки поглинання випромінювання газовими дифузантами (під терміном «газова домішка» розуміється, що речовина домішки в природному стані є газом) у вузьких ділянках спектра — смугах і лінійної залежності коефіцієнта поглинання реального газу від його густини, коефіцієнти поглинання домішкових компонент у (6) записані у вигляді [60, 65, 71]

$$a_{\lambda}^{(k)}(c_k) = \sum_{n_k=1}^{N_k} a_{\lambda_n}^{*(k)} c_k, \quad a_{\lambda_n}^{*(k)} = a_{\lambda_n}^{\text{атм}} \rho_{0L} / \rho_k^{\text{атм}}, \quad a_{\lambda_n}^{\text{атм}} = J_{\lambda_n}^{\text{атм}} / \Delta_{\lambda_n}^{\text{ef атм}}. \quad (7)$$

Тут N_k — кількість смуг поглинання k -ої домішки, а $\lambda_n^{(k)}$ — центр (довжина хвилі) n_k -ої смуги; $J_{\lambda_n}^{\text{атм}}$, $\Delta_{\lambda_n}^{\text{ef атм}}$ — відповідно інтенсивність і ефективна ширина смуги при атмосферному тиску [71]; $\rho_k^{\text{атм}}$, ρ_{0L} — густина реального k -го газу при атмосферному тиску і густина недеформованого каркаса.

Вираз для коефіцієнтів дифузії D_k газових дифузандів у твердому розчині при дії випромінювання знайдено з використанням теорії дифузійних стрибків (випадкових блукань [66]) і визначено через введені енергетичні характеристики E_k^{eq} домішок [62, 63, 70]. При цьому отримано

$$D_k(E_k^{eq}) = D_k^*(T) \exp \left[\frac{Q_k^*}{RT} \left(1 - \frac{RT}{E_k^{eq}} \right) \right], \quad (8)$$

де $D_k^*(T) = D_{0k} \exp(Q_k^*/RT)$; T — температура розчину; Q_k^{eq} , D_{0k} — відповідно енергія активації та частотний фактор для k -ої домішки [72, 73]. Вираз для $D_k^*(T)$ співпадає з відомим для коефіцієнта дифузії за врахування його температурної залежності (при відсутності дії випромінювання, коли $E_k^{eq} = RT$) [73].

Наведену вище модель узагальнено [66] на випадок дії лазерного (нетеплового) випромінювання, створюваного оптичними квантовими генераторами (ОКГ). На відміну від теплового випромінювання, яке має неперервний спектр, ОКГ неперервної чи імпульсної дії випромінюють концентрований (у пучку) спрямований потік електромагнітної енергії в окремих вузьких спектральних діапазонах (лініях), які в свою чергу утворюють у спектрі одну чи кілька неперервних смуг [4, 74]. Таке випромінювання в більшості випадків можна вважати практично монохроматичним і когерентним [4, 74]. Якщо інтенсивність випромінювання в пучку сягає великих значень (наприклад, при фокусуванні випромінювання ОКГ, коли $I_{\lambda}^{(e)} \sim 10^{19}$ Вт/м²·ср), закон Бугера (рівняння перенесення) не виконується і для опису поширення монохроматичного пучка випромінювання таких інтенсивностей застосовують нелінійне рівняння, яке за нехтування впливом власного теплового випромінювання тіла має вигляд [4]

$$\frac{\partial I_{\lambda}}{\partial g} + \frac{a_{\lambda} I_{\lambda}}{1 + \alpha I_{\lambda}} = 0. \quad (9)$$

Тут I_{λ} — спектральна інтенсивність випромінювання в пучку в тілі, g — віддаль у напрямку променя, α — коефіцієнт нелінійності. При цьому величина $Wa = (1 - R'_{\lambda}) \cdot \alpha I_{\lambda}^{(e)} n'_{\lambda}$ — критерій Вавилова [4] (де $I_{\lambda}^{(e)}$ — середня інтенсивність

у падаючому на тіло пучку лазерного випромінювання; R'_λ, n_λ — відповідно односпрямована спектральна відбивальна здатність поверхні тіла та спектральний показник заломлення відносно зовнішнього середовища) використовують для оцінки відхилення розв'язку рівняння (9) від закону Бугера. Таким чином, рівняння перенесення в наближенні не випромінюючого матеріалу [1], що лежить в основі феноменологічної теорії випромінювання, є застосовним для опису поширення лазерного випромінювання при $Wa \ll 1$. Надалі лазерне випромінювання від джерела, яке задовольняє цій умові, назвемо помірним.

Оскільки в описаній вище моделі механотермодифузії в частково прозорих тілах визначення чинників дії випромінювання базується на рівнянні перенесення (що виражає закон збереження електромагнітної енергії), а моделювання поширення випромінювання фотонами вірне для будь-якого виду випромінювання в світловому діапазоні (незалежно від його джерела), то така модель (при врахуванні специфіки спектрального розподілу випромінювання) може бути застосована для дослідження зумовлених дією помірного лазерного випромінювання тепломасоперенесення і деформування в тілах.

2. Дослідження механотермодифузійних процесів у частково прозорих тілах за умов дії світлового випромінювання

На основі запропонованої моделі та розробленої числово-аналітичної методики розв'язування відповідних задач математичної фізики (з застосуванням методу скінчених різниць) знайдено розв'язки задач механотермодифузії для шару, що містить «газові» домішки окису вуглецю та води:

- у разі дії теплового випромінювання, спричиненого нагрітою паралельною до основи шару поверхнею [70, 75, 76];
- при дії теплового випромінювання з коригованим спектром [77]. При цьому досліджено механотермодифузійні процеси в шаруватій системі, яка складається з неконтактуючих частково прозорого шару, що містить «газові» домішки окису вуглецю та води, і частково прозорого шару з бездомішкового матеріалу, що моделює фільтр, який коригує теплове випромінювання;
- за помірного лазерного (неперервної дії) опромінення однієї з його основ [66, 78].

Встановлено нові закономірності в розподілах компонент тензора напружень, температури і концентрацій домішок залежно від кількості і типу «газових» домішок у шарі, спектральних характеристик джерела випромінювання, умов тепло- і масообміну із зовнішнім середовищем, а саме:

— за теплового опромінення:

- зростання нерівномірності розподілу температури та максимальних рівнів розтягуючих та стискуючих напружень при зменшенні температури джерела випромінювання від 3000 до 1000 К;

- одночасне прискорення дифузії домішок окису вуглецю та води в приповерхневій області шару зі сторони опромінення;
- залежність швидкості дифузії домішок окису вуглецю та води від температури джерела випромінювання.

— за *теплого опромінення з коригованим спектром*:

- рівномірність прогріву шару при низьких рівнях напружень (порівняно з нагрівом тепловим випромінюванням);
- інтенсифікація дифузії домішок у шарі при низьких рівнях температури та напружень (порівняно з дифузією під дією теплового випромінювання);
- можливість стимуляції дифузії окремих видів домішок.

— за *помірного лазерного опромінення*:

- залежність рівня напружень у шарі від спектральних параметрів лазерів (при однакових їх потужностях);
- прискорення дифузії домішок окису вуглецю та води за відносно малих потужностей конкретних технологічних лазерів (за помірного опромінення);
- можливість стимуляції дифузії лише одного виду домішки.

Висновки. У роботі подано варіант теорії механотермодифузії багатокомпонентних частково прозорих твердих тіл (твердих розчинів) за умов дії ЕМВ світлового частотного діапазону, що враховує особливості масоперенесення, зумовлені глибинним характером введення електромагнітної енергії в такі тіла та відмінністю поглинальних властивостей складових компонент. Він базується на континуальній моделі твердої суміші домінантної компоненти (каркаса) і домішок та феноменологічній теорії поширення випромінювання. Вплив зовнішнього ЕМВ на компоненти тіла визначається пондеромоторними силами та притоками енергії ЕМВ до компонент. Враховується спричинена дією ЕМВ неоднорідність енергетичного стану компонент, яка зумовлює нерівноважні процеси обміну енергією в фізично малих елементах тіла. Взаємодія частинок домішкових компонент з каркасом у слабкому твердому розчині моделюється взаємодією з квазічастинками — фононами. Енергія, яку отримує каркас від домішки, виражається через частотні й енергетичні параметри фононів, що визначаються за відомими параметрами зовнішнього ЕМВ (яке описується квазічастинками — фотонами) та поглинальними характеристиками домішкових компонент. У рамках моделі описано відоме явище «фотостимульованої дифузії».

Із врахуванням специфіки опису поширення в тілі теплового та лазерного випромінювання здійснено постановки нових класів крайових задач механотермодифузії в частково прозорих твердих тілах за умов дії таких випромінювань.

Результати проведених досліджень можуть бути корисні для оцінки ефективності обробки (з метою нагріву чи стимуляції дифузії домішок) частково прозорих тіл з «газовими» домішками з допомогою випромінювання світлового діапазону та напруженого стану в них при дії такого випромінювання.

Література

- [1] *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением. — М.: Мир, 1975. — 934 с.
- [2] *Рубцов Н. А.* Теплообмен излучением в сплошных средах. — Новосибирск: Наука, 1984. — 277 с.
- [3] *Дерибере М.* Практическое применение инфракрасных лучей. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 440 с.
- [4] *Григорьев Б. А.* Импульсный нагрев излучениями: в 2 т. — М.: Наука, 1974. — Т. 1. — 320 с.
- [5] *Рыкалин Н. Н., Узлов А. А., Кокора А. Н.* Лазерная обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1975. — 296 с.
- [6] *Джафаров Т. Д.* Радиационно-стимулированная диффузия в полупроводниках. — М.: Энергоиздат, 1991. — 287 с.
- [7] *Капустин Ю. А., Колокольников Б. М., Свешников А. А.* Фотостимулированная диффузия золота в кремнии при импульсной фотонной обработке // Физ. и техн. полупр. — 1990. — Т. 24, № 2. — С. 318-322.
- [8] *Lubchenko A. F., Pavlovich V. N.* Laser stimulation of light interstitial diffusion in semiconductors and insulators // Phys. Status Solidi. — 1976. — Vol. 78, № 2. — P. k97-k101.
- [9] *Pavlovich V. N.* Photostimulated diffusion of light substitutional impurities in semiconductors and insulators // Phys. Stat. Solidi. — 1983. — Vol. B116, № 1. — P. k9-k14.
- [10] *Wagner T., Frumar M., Suskova V.* Photoenhanced dissolution and lateral diffusion of Ag in amorphous As-S layers // J. Non.-Cryst. Solids. — 1991. — Vol. 128, № 2. — P. 197-207.
- [11] *Гачкевич О. Р., Курницький Т. Л., Сосновий Ю. Р., Терлецький Р. Ф.* Математичне моделювання процесів тепломасопереносу в скляних тілах при їх обробці тепловим інфрачервоним випромінюванням з метою дегазації // Вопр. атомной науки и техники (ВАНТ). Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 1998. — Вып. 4(5), 5(6). — С. 45-47.
- [12] *Гачкевич О. Р., Сосновий Ю. Р., Терлецький Р. Ф.* Деякі проблеми вакуумних технологій виробництва чорно-білих і кольорових кінескопів // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер.: Ядерно-физические исследования (Теория и эксперимент). — 1994. — Вып. 1(27). — С. 47-50.
- [13] *Бурак Я. И., Гачкевич А. Р., Солодяк М. Т.* Термоупругость электропроводных магнитотвердых тел во внешних установившихся электромагнитных полях // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1988. — № 5. — С. 26-29.
- [14] *Бурак Я. И., Гачкевич А. Р., Терлецький Р. Ф.* Термомеханика тел низкой электропроводности во внешних квазиустановившихся электромагнитных полях // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1989. — № 7. — С. 38-41.
- [15] *Гачкевич А. Р.* Термомеханика электропроводных тел при воздействии квазиустановившихся электромагнитных полей. — К.: Наук. думка, 1992. — 192 с.
- [16] *Гачкевич О. Р., Касперський З., Солодяк М. Т., Терлецький Р. Ф.* Математичне моделювання та оптимізація зумовлених квазіусталеними електромагнітними діями фізико-механічних процесів в електропровідних тілах // Мат. методи і фіз.-мех. поля. — 1997. — Т. 40, № 1. — С. 66-72.
- [17] *Гачкевич А. Р., Мусий Р. С.* Термомеханика электропроводных тел при воздействии неустановившихся электромагнитных полей. — Львов, 1993. — 54 с. (Препр./ АН Украины, Ин-т прикл. проблем механики и математики им. Я. С. Подстригача; № 3-93).
- [18] *Термоупругость электропроводных тел / Подстригач Я. С., Бурак Я. И., Гачкевич А. Р., Чернявская Л. В.* — К.: Наук. думка, 1977. — 248 с.

- [19] *Гачкевич А. Р.* Определение и оптимизация термонапряженного состояния электропроводных тел во внешних квазиустановившихся электромагнитных полях // *Мат. методы и физ.-мех. поля.* — 1992. — Вып. 35. — С. 119-123.
- [20] *Гачкевич О. Р.* Математичні моделі термомеханіки здатних до намагнічення та поляризації електропровідних тіл при дії квазіусталеного електромагнітного випромінювання // *Мат. методи і фіз.-мех. поля.* — 1997. — Т. 41, № 1. — С. 97-107.
- [21] *Гачкевич О. Р., Терлецький Р. Ф.* Моделі термомеханіки намагнетовних і поляризованих електропровідних деформівних твердих тіл // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* — 2004. — Т. 40, № 3. — С. 19-37.
- [22] *Бурак Я. Й., Гачкевич О. Р., Терлецький Р. Ф.* Термомеханіка тіл низької електропровідності при дії електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону частот // *Доп. АН УРСР. Сер. А.* — 1990. — № 6. — С. 39-43.
- [23] *Гачкевич А. Р.* Термоупругость электропроводных тел, находящихся под воздействием электромагнитного излучения инфракрасного диапазона частот. — Львов, 1993. — 56 с. (Препр. / АН Украины, Ин-т прикл. проблем механики и математики; № 10-93).
- [24] *Гачкевич О. Р., Бойчук В. Я.* Термомеханическое поведение неметаллических электропроводных тел при высокотемпературной обработке // *Мат. методы и физ.-мех. поля.* — 1996. — Т. 39, № 1. — С. 74-79.
- [25] *Гачкевич А. Р., Драбык В. О., Сосновий Ю. Р., Терлецький Р. Ф.* Термонапряженное состояние стеклооболочки кинескопа при нагреве электромагнитным излучением // *Мат. методы и физ.-мех. поля.* — 1991. — Вып. 33. — С. 31-35.
- [26] *Малкиель Б. С., Гачкевич А. Р., Сосновий Ю. Р., Терлецький Р. Ф.* Температурные поля и напряжения в системе плоскопараллельных слоев при нагреве электромагнитным излучением // *Мат. методы и физ.-мех. поля.* — 1988. — Вып. 28. — С. 21-26.
- [27] *Коляно Ю. М., Кулик А. Н.* Температурные напряжения от объемных источников. — К.: Наук. думка, 1983. — 288 с.
- [28] *Підстригач Я. С., Чернуха Ю. А.* Задачі теплопровідності для опромінюваних оболонок // *Доп. АН УРСР. Сер. А.* — 1974. — № 3. — С. 262-267.
- [29] *Підстригач Я. С., Коляно Ю. М.* О нагреве источниками тепла тонких пластин и оболочек с теплообменом // *Инж.-физ. журн.* — 1964. — Т. 1, № 2. — С. 79-86.
- [30] *Дьярмати И.* Неравновесная термодинамика. — М.: Мир, 1974. — 304 с.
- [31] *Нугматулин Р. И.* Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978. — 336 с.
- [32] *Truesdell C., Toupin R.* The classical field theories // *Handbuch der Physik / Ed. by S. Flugge.* — Berlin: Springer-Verlag, 1960. — Bd. III/1. — P. 226-793.
- [33] *Atkin R. J., Craine R. E.* Continuum theories of mixtures. Basic theory and historical development // *J. Mech. Appl. Math.* — 1976. — Vol. 29. — P. 209-214.
- [34] *Bowen R. M.* Theory of mixtures // *Continuum physics III / Ed. by A.C. Eringen.* — New York: Academic Press, 1976. — 127 p.
- [35] *Карнаухов В. Г., Киричок И. Ф.* Механика связанных полей в элементах конструкций: в 5 т. — К.: Наук. думка, 1988. — Т. 4. Электротермовязкоупругость. — 320 с.
- [36] *Hutter K., van de Ven A. A.* Field-matter interaction in thermoelastic solids // *Lecture Notes in Physics.* — Vol. 88. — Berlin: Springer-Verlag, 1978. — 234 p.
- [37] *Бурак Я. Й., Галапац Б. П., Гнидець Б. М.* Фізико-механічні процеси в електропровідних тілах. — К.: Наук. думка, 1978. — 232 с.
- [38] *Підстригач Я. С., Бурак Я. И., Галапац Б. П., Гнидець Б. М.* Исходные уравнения теории деформации электропроводных твердых растворов // *Мат. методы и физ.-мех. поля.* — 1975. — Вып. 1. — С. 22-29.

- [39] Бурак Я. И., Галапац Б. П., Подстригач Я. С. Исходные уравнения теории деформации неполяризованных электропроводных твердых тел // Избранные проблемы прикладной механики. — М.: ВИНТИ, 1974. — С. 167–168.
- [40] Підстригач Я. С., Бурак Я. Й. Деякі аспекти побудови нових моделей механіки твердого тіла з урахуванням електронних процесів // Вісник АН УРСР. — 1970. — № 12. — С. 18–31.
- [41] Бурак Я. И., Галапац Б. П., Чапля Е. Я. Деформация электропроводных тел с учетом гетеродиффузии заряженных примесных частиц // Физ.-хим. механика материалов. — 1980. — № 5. — С. 8-14.
- [42] Бурак Я. И., Галапац Б. П., Чапля Е. Я. Исходные уравнения процесса деформации электропроводных твердых растворов с учетом различных путей диффузии примесных частиц // Мат. методы и физ.-мех. поля. — 1980. — № 11. — С. 60-66.
- [43] Гуров К. П. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов. — М.: Наука, 1982. — 128 с.
- [44] Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. — М.: Мир, 1964. — 456 с.
- [45] Петров Н., Бранков Й. Современные проблемы термодинамики. — М.: Мир, 1991. — 288 с.
- [46] Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. — М.: Мир, 1975. — 592 с.
- [47] Coleman В. D. Thermodynamics of materials with memory // Arch. Rat. Mech. & Anal. — 1964. — Vol. 17, № 1. — P. 1-46.
- [48] Kubic J. Thermodiffusion flows in a solid with a dominant constituent // Mitt. Inst. Mech. — Ruhr Univ., Bochum, 1985. — № 44. — 51 p.
- [49] Петров Н., Михайлова А., Джупанов В. Термодинамичен модел на деформируем полупроводник // Теоретична и приложна механика (София). — 1978. — Т. 9, № 1. — С. 42-46.
- [50] Lorenzi H. G., Tiersten H. F. On the interaction of the electromagnetic field with heat conducting deformable semiconductors // J. Math. Phys. — 1975. — Vol. 16, № 4. — P. 938-957.
- [51] Stefaniak J. The effect of an electromagnetic field on thermodiffusion in an isotropic medium. — Warszawa: Polish Academy of Sciences Press, Ser. Mechanika i Budownictwo, 1982. — Vol. IX. — P. 1-32.
- [52] Nowacki W. Certain problems of the thermodiffusion in solids // Arch. Mech. — 1971. — Vol. 23, № 6. — P. 731-755.
- [53] Parcus H. Magneto-thermoelasticity. — Wien-New York: Springer-Verlag, 1972. — 62 p.
- [54] Гачкевич А. Р., Голубец В. М., Чорный Б. И., Макаренко О. Н. Механотермодиффузионные процессы в приповерхностном слое пластины при нанесении эвтектического покрытия // Физ.-хим. механика материалов. — 1988. — № 2. — С. 12-17.
- [55] Підстригач Я. С. Диференціальні рівняння дифузійної теорії деформації твердого тіла // Доп. АН УРСР. — 1963. — № 3. — С. 336-340.
- [56] Подстригач Я. С. Диффузионная теория деформации изотропной сплошной среды // Вопр. механики реального твердого тела. — 1964. — № 2. — С. 71-99.
- [57] Maruszewski B. Termodynamiczne podstawy magnetotermodyfuzji i elektrotermodyfuzji w ośrodku ciągłym. Rozprawy. — Poznań: Pol. Poznańska, 1986. — 178 s.
- [58] Maruszewski B. Evolution equations of thermodiffusion in paramagnetics // Int. J. Eng. Sci. — 1987. — Vol. 25. — P. 145-149.
- [59] Гачкевич О., Касперська А., Курницький Т., Терлецький Р. Математичне моделювання і дослідження механотермодифузійних явищ у твердих тілах при дії теплового інфрачервоного випромінювання // Машинознавство. — 1999. — Т. 27, № 9. — С. 3-9.

- [60] *Гачкевич О. Р., Курницький Т. Л., Терлецький Р. Ф.* Дифузія газової домішки в напівпрозорому твердому тілі, спричинена дією електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 1997. — Т. 40, № 2. — С. 122-129.
- [61] *Гачкевич О. Р., Курницький Т. Л., Терлецький Р. Ф.* Модель термомеханіки тіл низької електропровідності в квазіусталених електромагнітних полях радіо- та інфрачервоного діапазону // *Вісник Львів. ун-ту. Сер. мех-мат.* — 2000. — Вип. 57. — С. 56-59.
- [62] *Gachkevich A., Kournyts'kyi T., Terletsii R.* Photostimulated molecular gas admixture diffusion in semitransparent amorphous solid // *Int. Comm. Heat Mass Transfer.* — 2001. — Vol. 28, № 3. — P. 399-410.
- [63] *Гачкевич О. Р., Курницький Т. Л., Терлецький Р. Ф.* Математичне моделювання фотостимульованої дифузії домішок у частково прозорих твердих тілах // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 2001. — Т. 44, № 3. — С. 107-119.
- [64] *Терлецький Р. Ф.* Моделювання термомеханічної поведінки багатокомпонентних деформівних твердих тіл низької електропровідності при дії електромагнітного випромінювання. Ч. 1. Балансові співвідношення механіки і другий закон термодинаміки // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 2001. — Т. 45, № 2. — С. 81-91.
- [65] *Gachkevich A., Kournyts'kyi T., Terletsii R.* Investigation of molecular gas admixture diffusion, heat transfer and stress state in amorphous solid subjected to thermal infrared radiation // *Int. J. Eng. Sci.* — 2002. — Vol. 40. — P. 829-857.
- [66] *Гачкевич О. Р., Терлецький Р. Ф.* Математичне моделювання механотермодифузійних процесів у частково прозорих деформівних твердих тілах з газовими домішками за умов дії електромагнітного випромінювання світлового діапазону частот // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 2003. — Т. 46, № 1. — С. 151-164.
- [67] *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением. — М.: Мир, 1975. — 934 с.
- [68] *Рубцов Н. А.* Теплообмен излучением в сплошных средах. — Новосибирск: Наука, 1984. — 277 с.
- [69] *Уэрт Ч., Томсон Р.* Физика твердого тела. — М.: Мир, 1966. — 568 с.
- [70] *Гачкевич О. Р., Курницький Т. Л., Терлецький Р. Ф.* Механотермодифузійні процеси в напівпрозорому твердому шарі при дії теплового інфрачервоного випромінювання // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 1998. — Т. 41, № 3. — С. 121-131.
- [71] *Тьен К. Л.* Радиационные свойства газов // *Успехи теплопередачи.* — М.: Мир, 1971. — С. 280-360.
- [72] *Бокиштейн Б. С., Бокиштейн С. З., Жуковицкий А. А.* Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. — М.: Металлургия, 1974. — 280 с.
- [73] *Еремеев В. С.* Диффузия и напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 182 с.
- [74] *Делоне Н. Б.* Взаимодействие лазерного излучения с веществом. — М.: Наука, 1989. — 280 с.
- [75] *Гачкевич О. Р., Курницький Т. Л., Терлецький Р. Ф.* Термомеханічна поведінка шару з газовими домішками при дії теплового інфрачервоного випромінювання // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* — 1999. — Т. 42, № 2. — С. 141-146.
- [76] *Гачкевич А. Р., Курницький Т. Л., Терлецький Р. Ф.* Напряженное состояние в стеклянных телах при их дегазации с использованием нагрева инфракрасным излучением // *Прикл. механика и техн. физика.* — 2002. — Т. 43, № 2. — С. 155-165.
- [77] *Kournyts'kyi T., Matysiak S., Terletsii R.* Heat and mass transfer in two-layer elastic

- composite subjected to thermal infrared radiation // Int. J. Eng. Sci. — 2003. — Vol. 41. — P. 1951-1964.
- [78] Kournys'kyi T., Matysiak S., Gachkevich A. Effect of laser radiation upon heat and mass transfer in two-component elastic semitransparent layer // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 2004. — Vol. 47. — P. 977-985.

Механотермодиффузионные процессы в частично прозрачных деформируемых твердых телах с примесями при воздействии электромагнитного излучения светового диапазона частот

Александр Гачкевич, Ростислав Терлецкий

Приведены результаты математического моделирования и исследования процессов тепло-массопереноса и деформирования в частично прозрачных телах с примесями находящихся под воздействием теплового или лазерного излучения, полученные с использованием континуальной модели твердой смеси доминантной компоненты (каркаса) и примесей и феноменологической теории излучения. Учтено известное явление «фотостимулированной диффузии». Выявлены новые закономерности в распределениях компонент тензора напряжений, температуры и концентраций газовых примесей в слое в зависимости от их количества и типа, энергетических и спектральных характеристик источника излучения, условий тепло- и массообмена с внешней средой.

Mechanical, Thermal and Diffusive Processes in Semitransparent Elastic Solids with Impurities Subjected to Electromagnetic Radiation in Visible Range

Alexandr Gachkevich, Rostyslav Terletskii

The results of mathematical modelling and investigation of heat and mass transfer in elastic semitransparent solids with impurities subjected to heat or laser radiation are presented. They are grounded on continuum model of hard mixture, composed of dominant component (matrix) and impurities, and phenomenological theory of radiation. Photostimulated diffusion phenomenon is taken into consideration. The new features of the effect of energetic and spectral characteristics of radiation source, the composition and types of impurities, the heat and mass exchange conditions on the stress, the temperature and the concentrations of gas impurity in the layer are established.

Отримано 21.11.05