

ХАРАКТЕР РУХУ МЕЖФАЗНИХ ГРАНИЦЬ ПРИ НЕІЗОТЕРМІЧНИХ УМОВАХ ФОРМУВАННЯ ДИФУЗІЙНОГО ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА МЕТАЛАХ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЕНЕРГІЙ АКТИВАЦІЇ ДИФУЗІЇ

Нестеренко О. І., професор кафедри енергетики, доктор фізико-математичних наук, Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро; Сахно В. М., доцент кафедри вищої математики, фізики та загальної інженерних дисциплін, кандидат фізико-математичних наук, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро; Нестеренко М. Г., доцент кафедри програмного забезпечення інформаційно-виміральної техніки, кандидат фізико-математичних наук, Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро

Еволюція структури та фазового складу дифузійних захисних шарів, у більшості випадків, визначається дифузійним перенесенням компонентів, що входять до складу цих шарів. Вивченню кінетики дифузійних процесів, дослідженню структури та фазового складу багатофазних дифузійних систем присвячено низку робіт радянських та зарубіжних вчених: Гурова К.П., Щербединського Г.В., Мокрова А.П., Лобова Б.Я., Ларікова Л. Н., Райченко А.І., Хусіда Б.М., Бокштейна С.З., Ісакова М.Г., Криштала М.А., Зайта Би., Даркена Л.С. та ін.

Однак, дифузія в багатофазних системах, що протікає в неізотермічних умовах при впливі на поверхню металу локальних концентрованих джерел енергії, вивчена як в експериментальному, так і в теоретичному плані недостатньо глибоко [1]. Це пов'язано насамперед зі складністю механізму неізотермічного насичення та його експериментального відстеження. Дифузія в неізотермічних умовах протікає на тлі таких процесів, як подрібнення зеренної структури, зміна щільності дефектів кристалічної ґратки, виникнення значних напружень і градієнтів температур. Тому проблема моделювання поведінки дифузійної системи в неізотермічних умовах, кількісний опис еволюції міжфазних границь та концентраційного поля на кожній стадії неізотермічної обробки є актуальною.

Характер руху межфазної границі на ділянці неізотермічного нагрівання чи охолодження має складний вид. Закон руху міжфазного кордону значною мірою відрізняється від класичного параболического зростання фаз. А, як було показано нами в роботах [2, 3], при термоциклічній обробці цей рух носить зворотно-поступальний (коливальний) характер.

Дифузія в бінарній системі, при неізотермічному режимі нанесення захисного покриття, описується системою диференціальних рівнянь другого порядку в приватних похідних на основі другого закону Фіка. Слід враховувати ще експоненціальну (Ареніусівську) залежність коефіцієнта дифузії від температури. Крім того, систему рівнянь необхідно доповнити граничними умовами на зовнішній поверхні і рівнянням балансу маси на внутрішній рухомій границі розділу фаз.

Розв'язання цієї задачі проводилося чисельно, з використанням розробленого авторами методу «допоміжної сітки» [4, 5], адаптованим для умов неізотермічної дифузії.

На рис.1 наведено результати розрахунку модельної задачі для двохфазної системи з урахуванням різних значень співвідношення енергій активації дифузії в фазах покриття, що зростають, і характеру неізотермічного нагріву (або охолодження) металу основи.

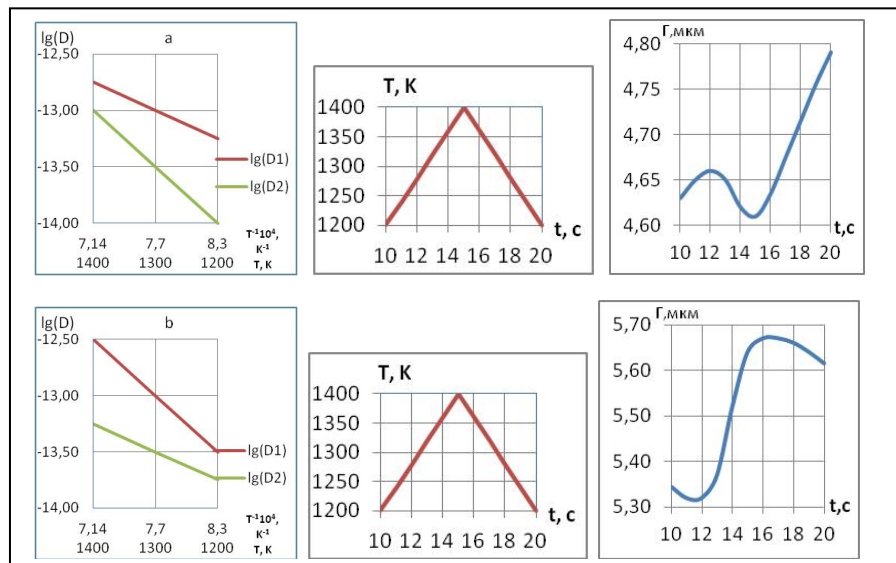


Рис.1 Характер руху міжфазної границі, в залежності від значень енергії активації у фазах та зміни температури дифузійної зони.

Для ідентифікації характеру руху міжфазної границі було обрано два варіанти можливих співвідношень між енергіями активації в зростаючих фазах. У першому випадку, енергія активації дифузії у першій фазі менша, ніж у другій $Q_1 < Q_2$. Тобто зростання значення коефіцієнта дифузії з температурою у другій фазі відбуватиметься швидше, ніж у першій. У другому випадку - зворотна ситуація.

Як видно з малюнка, графіки температурних залежностей D_1 і D_2 у першому випадку зближуються зі збільшенням температури (рис.1a), тоді як у другому разі – розбігаються (рис.1b). Залежно від цього, кордон поводить ся неординарно. У разі a) -інтенсивно росте при охолодженні і підрозчиняється при нагріванні. У разі b) – картина обернена.

Резюмуючи, можна зробити такі висновки:

- Еволюція фаз при неізотермічному режимі нанесення захисного дифузійного покриття носить неординарний характер - міжфазна границя

рухається складним чином, і її рух значною мірою відрізняється від класичного параболічного закону зростання фаз.

- Величини енергій активації дифузії у фазах системи визначають характер залежності положення міжфазного кордону $\Gamma(t)$ від часу. А саме, якщо енергія активації дифузії в першій фазі менша, ніж у другій, то крива залежності випукла при нагріванні (і, в деяких випадках, може навіть спостерігатися підрозчинення фази при нагріванні!) і увігнута при охолодженні (спостерігається інтенсивне зростання фази при охолодженні!). Якщо ж енергія активації дифузії в першій фазі більша, ніж у другій, то крива залежності вогнута при нагріванні і опукла при охолодженні (розчинення фази можливе тільки при охолодженні).

- З розрахунку, цілком очевидно, що при термоциклічному режимі нанесення покриттів, моментам початку і кінця нагрівання будуть відповідати точки перегину залежності координати міжфазної границі $\Gamma(t)$ від часу.

Список літератури

1. Yarmolenko M. V. Enhanced diffusion and other phenomena during rapid heating of bimetals: Theory and experiments //Defect and Diffusion Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 1997. – Т. 143. – С. 1613-1618.

(DOI:10.4028/www.scientific.net/DDF.143-147.1613)

2. Nesterenko A. Limiting processes in the creation of protective diffusion layers under non-isothermal conditions / A. Nesterenko, N. Nesterenko, V. Sakhno // Science, Practice and Theory: Abstracts of the IV International Scientific and Practical Conference (February 1-4, 2022, Tokyo, Japan). – International Science Group, 2022. – P. 479–488.

(UDC 01.1 ISBN - 978-1-68564-507-6 DOI - 10.46299/ISG.2022.I.IV)[

3. Nesterenko A. Analysis of the influence of diffusion activation energies and parameters of thermal cycling treatment on the evolution of the structure and composition of multiphase metallic systems / A. Nesterenko, N. Nesterenko, V. Sakhno // Theoretical Foundations in Practice and Science: Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference (December 21-24, 2021, Bilbao, Spain). – International Science Group, 2021. – P. 497–504.

(UDC 01.1 ISBN - 978-1-68564-523-6 DOI - 10.46299/ISG.2021.II.XIV)

4. NESTERENKO, A. I.; SAKHNO, V. N. Quantitative analysis of the influence of in-phase diffusion activation energy on the interfaces evolution under thermal cycling saturation.// Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov, 1994, Pp. 98-108. (ISSN 0015-3214)

5. AI Nesterenko, VN Sakhno, VF Shatinskii Computer modeling of the process of deposition of the two-phase chrome coating on steel in thermal cycling conditions with high-frequency heatin Soviet materials science: a transl. of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov/Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1989, 24, # 4, p. 341-345 (ISSN: 00385565 1573885X DOI: 10.1007/BF00720640)