

5. Analysis of microstructural changes induced by linear friction welding in a nickel-base superalloy [Текст] / O.T. Ola, O.A. Ojo, P. Wanjara, M.C. Chaturvedi // Metallurgical and materials transactions A. – 2011. – Vol. 42A. – pp. 3761-3777.

УДК 539.219.3

**Мазанко В.Ф., докт. техн. наук, професор
Герцик Д.С., канд. фіз-мат. наук**

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, м. Київ, vmazanko@imp.kiev.ua

ДИFUЗИЯ В ТВЕРДОМУ СТАНІ МЕТАЛІВ ЗА РІВНОВАЖНИХ УМОВ ТА ПРИ ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Слово «дифузія» походить від латинського *diffusio* – розповсюдження, поширення, розтікання, взаємне проникнення атомів (молекул) речовин, які знаходяться у контакті, внаслідок теплового руху часток речовини: молекул, атомів, іонів, і вона відбувається в напрямку зменшення концентрації речовини й веде до його рівномірного розподілу по об'ємі. Як відомо, дифузія буває в газах, рідинах і твердих тілах. В основі різноманітних дифузійних явищ лежить єдиний механізм атомарного (молекулярного) переносу маси.

За рівноважних умов, тобто постійній температурі відпалу та інших незмінних параметрах, найбільш швидко дифузія відбувається в газах, повільніше в рідинах, ще повільніше - у твердих тілах. Траєкторія руху кожної частки газу являє собою ламану лінію, тому що при зіткненнях вона міняє напрямок і швидкість руху. Тому величина зсуву частки, обмірювана по прямій між початковою й кінцевою крапками, набагато менше шляху, фактично пройденому часткою. Отже швидкість дифузійного проникнення менше швидкості самих молекул. Число зіткнень росте пропорційно часу, збільшується з ростом температури, зменшується зі зменшенням тиску й молекулярної маси. Дифузія великих часток (наприклад, диму або суспензії) здійснюється завдяки броунівському руху. У рідинах дифузія здійснюється перескоком молекул з одного стійкого положення в інше. Кожний стрибок відбувається при наданні молекулі енергії, достатньої для розриву її зв'язків із сусідніми молекулами й переходу в оточення інших молекул у нове енергетично вигідне положення. Переміщення при такому стрибку не перевищує міжмолекулярної відстані. З ростом температури збільшується швидкість. У твердому тілі можуть діяти кілька механізмів: обмін місцями атомів з вакансіями, переміщення атомів по міжвузлях, одночасне циклічне переміщення декількох атомів за краудіонним механізмом, міграція атомів по дефектах кристалічної ґратки: границь зерен та фаз, вздовж дислокацій, в тонкому поверхневому шарі та ін. Збільшення числа дефектів, що виникають при нагріванні, гартуванні, статичних та імпульсних деформаціях, бомбардуванні іонами та електронами та інших впливах на метал полегшує переміщення атомів у твердому тілі, тому їх рухливість підвищується.

Дифузійні процеси у твердій фазі лежать в основі спікання порошків, хіміко-термічної обробки металів, створення нероз'ємного з'єднання без розплавлення шляхом дифузійного зварювання, створення покриттів з потрібними властивостями або модифікування приповерхневих шарів металічних матеріалів та ін. Дифузійна металізація полягає в насиченні поверхневих шарів металевих виробів різними металами, і саме покриття може формуватися із твердої, рідкої парової або газової фаз, але його адгезію з основним матеріалом забезпечує взаємна дифузія, яка відбувається між покриттям та масивним матеріалом (виробом).

Вивчення дифузії в твердому стані розпочалось з 1896 р., коли шотландський вчений В. Ч. Робертс-Остин на металічній парі золото-свинець експериментально довів існування дифузії в твердій фазі [1]. В його честь російський вчений Д. К. Чернов одну із фазових

складових сталі (твердий розчин вуглецю у високотемпературній фазі заліза γ -Fe) назвав аустенітом.

В 50-х рр. С. Д. Герцрикен та його співробітники в Інституті металофізики АН УРСР здійснюють систематичні дослідження процесів дифузії в металевих системах і впливу різних чинників на особливості та механізм переносу речовини, розпочинають вивчення виникнення та рухливості дефектів кристалічної будови металів та сплавів, зв'язку дифузійних процесів, дефектності структури та жароміцності конструкційних матеріалів [2]. Одним з важливих чинників виявилася температура відпалу.

В 1974 р. в Інституті металофізики спільно з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона при дослідженні механізму і кінетики дифузійних процесів у твердій фазі під час зварювання було відкрите нове явище - аномальне масоперенесення при імпульсному навантаженні. Воно полягає в тому, що за умов імпульсного навантаження спостерігається міграція атомів у твердій фазі зі швидкістю, що перевищує у $10^9 - 10^{15}$ разів рухливість атомів, одержану в ізотермічних умовах, і у 10^3 разів – рухливість у рідкому металі [3].

На відміну від класичної дифузії зменшується роль температури та індивідуальних характеристик металу і дифундуючого атому у перебігу процесу перенесення, виникає можливість здійснювати процес міграції атомів на макроскопічні відстані взагалі без нагріву та при криогенних температурах, причому починаючи з деякої граничної температури, спостерігається зростання рухливості атомів із зменшенням температури [3]. Однак з'явилися нові чинники, зокрема, швидкість та в меншій мірі ступінь пластичної деформації, кількість імпульсних впливів, одночасної дії двох або більшого числа впливів. Слід зазначити, що залежність рухливості атомів від швидкості деформації має нелінійний характер з двома максимумами, але в цілому є надзвичайно великий приріст швидкості міграції, що перевищує дифузію в газовій фазі ($1 - 50 \text{ см}^2/\text{с}$). При цьому зі зростанням швидкості пластичної деформації зменшується різниця в значеннях коефіцієнтів масоперенесення (дифузії) не лише в металах та сплавах на їх основі, а й в різних металах:

$\sim \dot{\epsilon}, \text{ с}^{-1}$	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
D_M^{Zn} / D_M^{Nb}	10070	4150	610	15	11	4	1,5

В подальшому виявилось, що ініціювати надзвичайно прискорену дифузію також за міжвузельним механізмом можуть різноманітні імпульсні впливи, такі як вибухове навантаження, лазерне опромінювання, прокатка, деформування в імпульсних електромагнітних полях, ультразвукова ударна обробка, газові розряди [4-6].

Такі великі швидкості міграції атомів призводять до аномального фазоутворення, взаємного розчинення будь-яких елементів, виникнення нових фаз. В свою чергу це дає можливість створювати нові технології зварювання без розплавлення, хіміко-термічної обробки матеріалів, самі нові матеріали.

Список посилань

1. Roberts-Austin W.C. Phil. Trans. Roy. Soc., London. – 1896, A187, 353.
2. Герцрикен С.Д. Диффузия в металах и сплавах в твердой фазе. / Герцрикен С.Д., Дехтяр И.Я. М.: Физматгиз, 1961. – 256 с.
3. Герцрикен Д.С. Импульсная обработка и массоперенос в металах при низких температурах. / Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Фальченко Ф.М. – К.: Наукова Думка, 1991 –. 208 с.
4. Диффузионные процессы в металах под действием магнитных полей и импульсных деформаций, в 2-х т. / [Мазанко В.Ф. и др.], М.: Машиностроение, 2006. – Т.1. – 346 с.; Т.2. – 320 с.
5. Искровой разряд и диффузионные процессы в металах. / В.Ф. Мазанко [и др.]; Нац. акад. наук Украины, Ин-т металофізики им. Г.В. Курдюмова. – К.: Наукова думка, 2014. – 190 с.
6. Влияние тлеющих и дуговых разрядов на диффузионные процессы / [А. М. Штеренберг, В.Ф.Мазанко, Д. С. Герцрикен и др.]. – Москва : Инновационное машиностроение, 2018. – 378 с.