

Швидкість деформації, рухливості атомів і механічні властивості металів

Д. С. Герцрікен, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, deciatinka@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7493-9761>

А. М. Гусак*, доктор фізико-математичних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2594-5559>

В. Ф. Мазанко, доктор технічних наук, професор, vmazanko@imp.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7549-352X>

С. Є. Богданов, кандидат фізико-математичних наук, besal@bigmir.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3409-2487>

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

*Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, Черкаси

Методами, що базуються на застосуванні радіоактивних індикаторів ^{55}Fe , ^{95}Nb , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{63}Ni , ^{26}Al , ^{44}Ti (пошаровий радіометричний аналіз залишкової інтегральної активності, макро- та мікроавторадіографія) вивчено залежності коефіцієнтів дифузії в металах з різним типом кристалічної ґратки (ОЦК, ГЦК, ГЦП, ОЦТ), підданих імпульсним впливам різними видами обробки у широкому інтервалі швидкостей деформації ($10^{-2} - 10^6 \text{ c}^{-1}$) без нагріву та при $T \leq 0,5 T_{\text{пл}}$. Застосовувалися такі види обробки, як ультразвукова ударна обробка, дифузійне зварювання, ударне навантаження, магнітноімпульсна обробка тощо. На цих же матеріалах, підданих тим же самим видам обробки, визначалися механічні характеристики (ударна в'язкість, мікротвердість, межа міцності та ін.). Крім того були використані літературні дані, пов'язані з визначенням деяких механічних характеристик при деформуванні металів з різними швидкостями.

Виявилось, що із зростанням швидкості пластичної деформації відбувається не тільки збільшення рухливості атомів, але і зменшення відмінностей в значеннях коефіцієнтів дифузії атомів основного металу та інших дифузантів у різних металах. Незважаючи на велику різницю у температурах плавлення, зокрема, цинку та ніобію, їх коефіцієнти самодифузії при міграції атомів без нагріву при швидкості 10^6 c^{-1} відрізняються всього в 1,5 рази, в той час як при 1 c^{-1} різниця в рухливості атомів становить 4 порядки.

Показано, що залежності механічних характеристик від швидкісної дифузійних процесів можуть бути прямолінійними, мати екстремум або перегин, але вони будуть приблизно однаковими для коефіцієнтів дифузії та параметрів, які характеризують механічні властивості металів при імпульсних навантаженнях.

Встановлення цих швидкісних залежностей дає можливість визначити проміжні та екстрапольовані значення вказаних характеристик, а також за графіком однієї залежності з певною точністю передбачити характер іншої.

Фазові перетворення

Ключові слова: радіоактивні ізотопи, само- та гетеродифузія, імпульсні навантаження, швидкість деформації, механічні характеристики.

Як показано раніше [1, 2], з ростом швидкості деформації зближуються значення рухливості атомів в металах і сплавах на їх основі, аж до збігу їх величин в твердих розчинах заміщення, втілення і вилучення, в багатокомпонентних системах і складнолегованих сплавах з домішками з металів і легких елементів при високих швидкостях деформації. Крім того, в роботі [3, 4] зазначалося, що при магнітноімпульсній обробці зі швидкостями $10^3 - 5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ рухливість атомів заліза в залізі і міді відрізняється менш, ніж на 20 %. При деформації падаючим вантажем в інтервалі температур 273 – 573 К швидкість міграції атомів нікелю в цинку і міді ($\dot{\epsilon} \sim 50 \text{ c}^{-1}$) відрізняється всього у півтора-два рази [5]. Тобто підвищення швидкості деформації може впливати на величину відмінності в значеннях коефіцієнтів масопереносу в самих різних металах. З іншого боку, в роботах [6-8] було показано, що зі збільшенням швидкості деформації відмінність між впливом на механічні властивості металів (заліза, сталі, алюмінію, сплав АМг2 і ін.) різних видів імпульсної обробки (кручення, волочіння, розтягування) зменшується. Так, зі збільшенням $\dot{\epsilon}$ від $2 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \text{ c}^{-1}$ залежність напруження від деформації при розтягуванні і крученні маловуглецевої сталі укладається практично на одну криву [7]. Отже, необхідно розглянути ще один прояв впливу швидкості пластичної деформації на міграцію атомів, а також на механічні характеристики металів.

Особливості міграції атомів в імпульсно деформованих металах (ОЦК - Fe, Mo, Nb, W; ГЦП - Co, Zn, Ti; ГЦК - Ni, Cu, Al, ГЦТ - Sn) вивчали методами, заснованими на застосуванні радіоактивних індикаторів (^{55}Fe , ^{95}Nb , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{63}Ni , ^{26}Al , ^{44}Ti). Величини глибини проникнення і коефіцієнтів дифузії усереднювалися за значеннями, відповідно дифузійним зонам, що утворюються при імпульсному впливі в напрямку дії деформуючого імпульсу і в протилежному напрямку.

Для деформування металів в широкому інтервалі швидкостей деформації ($\dot{\epsilon}$, c^{-1}) застосовували наступне обладнання: установку для дифузійного зварювання ($10^{-2} - 0,1 \text{ c}^{-1}$); установку для ультразвукової ударної обробки ($0,1 - 0,6 \text{ c}^{-1}$); прокатний стан ДУО 170 ($1 - \sim 20 \text{ c}^{-1}$); установку для ударного зварювання в вакуумі УСВ ($0,5 - \sim 300 \text{ c}^{-1}$), що дозволяє здійснювати імпульсне навантаження за допомогою удару по зразку вантажем, який вільно падає або розганяється [9-12]; спеціально сконструйований пристрій для ударного навантаження металів ($10^2 - 10^3 \text{ c}^{-1}$) [13], імпульсний вплив в якому здійснюється за снарядом, який летить горизонтально; установку МІУ-23, принцип навантаження в якій полягає в зіткненні внутрішнього зразка з зовнішнім зразком, який розганяється в імпульсному електромагнітному полі ($5 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$) [14, 15]; зварювальний комплекс, який здійснює зварювання за рахунок енергії вибуху ($10^5 - 10^6 \text{ c}^{-1}$) [16].

Оскільки високоінтенсивні впливи на метал, такі як удар падаючим вантажем, магнітноімпульсне і вибухове навантаження призводять до

Фазові перетворення

підвищення температури, то, з огляду на проведені раніше докладні дослідження величини теплового ефекту при даних способах деформування [11, 17], зразки перед навантаженням охолоджувалися до відповідних температур, як правило, на 10 – 400 К. Відзначимо, що вивчення рухливості атомів при магнітноімпульсній деформації проводили тільки на внутрішньому зразку, на поверхні якого магнітне поле відсутнє.

Механічні властивості деформованих металів вивчали за стандартними методиками [18]. Рухливість атомів і механічні властивості визначали на зразках, підданих однаковою енергетичному впливу.

Як показали проведені експерименти, з ростом швидкості деформації спостерігається збільшення рухливості атомів в імпульсно деформованому металі (табл. 1). Це справедливо як для власних атомів, так і для елементів заміщення. При цьому рухливості власних атомів і атомів елементів заміщення в різних металах зближуються, і при певних значеннях швидкості деформації вони стають практично однаковими (табл. 2). Спостерігається така закономірність – чим більше відрізняються температури плавлення порівнюваних металів, тим при більшій швидкості деформації збігаються в них коефіцієнти масопереносу. Той же ефект спостерігається і при гетеродифузії атомів металів і легких елементів (табл. 3).

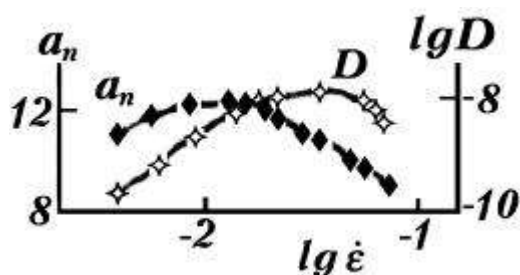


Рис. 1. Залежність коефіцієнта самодифузії (D) і ударної в'язкості (a_n) в залізі від швидкості деформації.

Із збільшенням швидкості деформації відбувається зростання твердості деформованого металу, межі міцності, інших механічних характеристик [8,19]. В роботі [19] було показано, що при деформації за умов дифузійного зварювання маловуглецевої сталі (1273 К) спостерігається подібна залежність від швидкості деформації ударної в'язкості і коефіцієнта самодифузії. Оскільки основна частина експериментів проводилася на чистому

залізі в α -стані, для подальшого порівняння результатів впливу швидкості деформації при малих і великих швидкостях навантаження ці експерименти були повторені на залізі при 1163 К. Виявилося, що і в цьому випадку спостерігаються однакові швидкісні залежності механічної та дифузійної характеристик (рис. 1). Однак точка максимуму на графіках обох функцій не збігається, а помітно зміщується по осі швидкостей деформації. Так, падіння рухливості атомів заліза починається від значення $0,03 \text{ c}^{-1}$, а ударної в'язкості – від $0,01 \text{ c}^{-1}$. Приблизно такі ж точки екстремумів при більш високих температурах обробки спостерігаються і для аустенітної сталі.

Зіставлення швидкості перенесення атомів і зміни механічних властивостей різних металів в широкому інтервалі також показало їх кореляцію (рис. 2 – 4). Подібного роду дослідження проводилися раніше [20], однак при цьому порівнювалися коефіцієнти дифузії не завжди атомів основного металу з різними характеристиками у процесі деформації, взятими

Фазові перетворення

Таблиця 1

Вплив швидкості деформації на масоперенос в залізі і нікелі, які зазнають дії різних видів імпульсної обробки при 300 К

Вид обробки	$\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	D_M , см ² /с	
		Fe	Ni
Ультразвукова ударна обробка	0,1	$7,0 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
	0,12	$8,1 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
	0,15	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$
	0,2	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$
	0,3	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$
	0,6	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$7,7 \cdot 10^{-8}$
Прокатка	0,5	$9,3 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
	1	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	2,5	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$
	5	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$
	7,5	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$
	10	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$
Ударне механічне навантаження	0,5	$8,0 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$
	1	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$
	5	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$8,8 \cdot 10^{-7}$
	10	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$
	30	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$
	60	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
	10^2	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$
	$3 \cdot 10^2$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
	$5 \cdot 10^2$	0,11	0,13
Магнітно-імпульсна обробка	$5 \cdot 10^2$	3,1	2,8
	$7 \cdot 10^2$	3,7	3,3
	10^3	4,2	3,8
	$5 \cdot 10^3$	15,5	15
	$1,2 \cdot 10^4$	22	22,5
	$4,5 \cdot 10^4$	45	44
	$7 \cdot 10^4$	82	84
Вибухова обробка плоскою хвилею	10^5	0,12	0,11
	$5 \cdot 10^5$	0,58	0,6
	10^6	0,95	0,97

Фазові перетворення

Таблиця 2

Відношення рухливості власних атомів в різних металах в умовах високошвидкісної деформації різними способами без нагріву

$\sim \epsilon', c^{-1}$	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
D_M^{Ni} / D_M^{Fe}	5,5	3,5	1,4	0,9	1	1	1
D_M^{Co} / D_M^{Sn}	52	25	9	1,9	1	1	1
D_M^{Zn} / D_M^{Nb}	10070	4150	610	15	11	4	1,5
D_M^{Al} / D_M^{Ti}	23	14	6,5	2,5	1,2	1	1

Таблиця 3

Відношення рухливості атомів елементів, які утворюють тверді розчини заміщення, в різних металах за умов високошвидкісної деформації

T, K	*Me	$\sim \epsilon', c^{-1}$	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
293	^{63}Ni	D_M^{Fe} / D_M^{Cu}	6,7	3,6	1,6	0,85	1	1	1
373	^{63}Ni	D_M^{Co} / D_M^{Sn}	49	21	8	1,8	1	1	1
573	^{55}Fe	D_M^{Zn} / D_M^{Nb}	10000	4200	650	14	10	4,5	1,4
823	^{55}Fe	D_M^{Al} / D_M^{W}	29210	9850	1005	155	65	17	2

з наукової літератури і, як правило, з декількох статей. Отже, зіставлялися результати механічних випробувань і дифузійних досліджень, проведених на матеріалах з різним розміром зерна і кількістю домішок. І якщо для перенесення речовини це не настільки суттєво, оскільки при швидкісному деформуванні чистота металу і величина зерна мало впливає на рухливість атомів, то механічні властивості суттєво залежать від структури і хімічного складу деформованого металу. Тому в даній роботі проводили по можливості вимірювання дифузійних і механічних характеристик на одних і тих же матеріалах за однакових умов навантаження. Для заліза і алюмінію використовували власні мічені атоми. На жаль, радіоактивні ізотопи міді і молібдену настільки короткоживучі, що довелося використовувати атоми нікелю. Літературні дані взято тільки для величин, що характеризують механічні властивості алюмінію.

Зі збільшенням швидкості деформації (рис. 2) при низькій температурі імпульсного впливу рухливість атомів заліза, як і межа його міцності є монотонними функціями швидкості деформації, що може вказувати на наявність їх взаємозв'язку. Аналогічні монотонні залежності спостерігаються і для

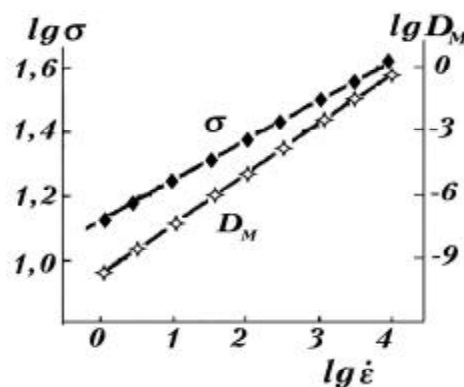


Рис. 2. Залежність рухливості атомів (D_M) і межі міцності (σ) заліза від швидкості пластичної деформації.

Фазові перетворення

тугоплавких металів молібдену і ніобію, однак для них залежність рухливості атомів від швидкості деформації значно помітніша.

Розглянемо залежності швидкості рухливості атомів і твердості. Як видно з рис. 2, в логарифмічних координатах вони описуються прямими лініями. Однак значення коефіцієнта дифузії зростають помітно сильніше, ніж мікротвердості. Аналогічні залежності спостерігаються і при деформації заліза в тому ж інтервалі швидкостей деформації. Вплив швидкості деформації на механічні властивості деформованого заліза в даному випадку виражено також слабкіше, ніж на швидкість міграції атомів. Аналогічний результат збігу форми швидкісних залежностей напружень і рухливості атомів отримано на нікелі і міді при їх обробці розтягуванням в імпульсному магнітному полі [21]. Зазначимо, однак, що залежність твердості заліза $HV = f(\dot{\epsilon})$, наведена в роботі [22], має дещо інший вигляд – з екстремумом при малих швидкостях, причому мінімальне значення HV спостерігається при швидкості деформації $3 - 5 \text{ c}^{-1}$. Твердість заліза стає простою ступеневою функцією без екстремуму з меншим показником ступеня n , що становить величину $0,02 - 0,03$. Проте в інтервалі швидкостей деформації $1 - 100 \text{ c}^{-1}$ залежності $HV = f(\dot{\epsilon})$ та $DM = f(\dot{\epsilon})$ в логарифмічних координатах практично однакові.

Зіставлення коефіцієнтів масопереносу в алюмінії з його механічними характеристиками, визначеними в інтервалі швидкостей деформації $1 - 5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ [8], показало, що різке зростання значень коефіцієнтів масопереносу, меж міцності і плинності починається при швидкості деформації понад $\sim 2 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$ (рис. 3). При цьому зміна кривизни функції для залежності $\lg D_M = f(\lg \dot{\epsilon})$ починається при менших швидкостях, ніж для функції $\sigma = f(\lg \dot{\epsilon})$.

Для ударної в'язкості, як зазначалося раніше (рис. 1), має місце зворотня закономірність локалізації точок максимумів.

Таким чином, яку б форму не мала залежність швидкості самої гетеродифузії: прямолінійну, з екстремумів або з точкою перегину,

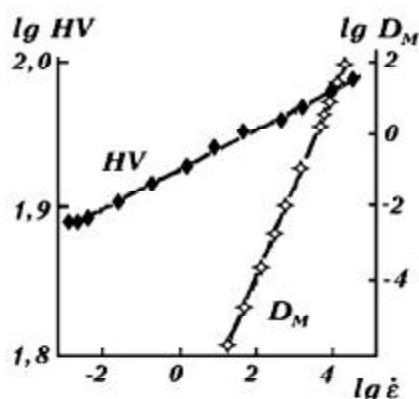


Рис. 3. Залежність твердості деформованого різними способами зразка з міді і рухливості в ній атомів нікелю ^{63}Ni від швидкості деформації при тих же видах імпульсної обробки без нагріву.

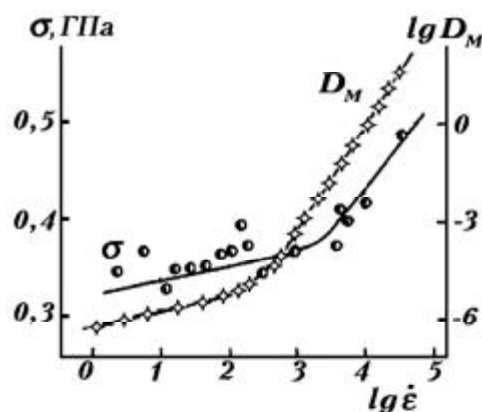


Рис. 4. Залежність рухливості власних атомів і механічних властивостей (меж міцності і плинності алюмінію при 300 K від швидкості пластичної деформації.

Фазові перетворення

залежність механічних властивостей від швидкості описується аналогічною функцією.

Слід зазначити, що все це має місце лише при само- та гетеродифузії в чистих металах та нескінченно розведених твердих розчинах до того ж за умов одного акту навантаження, за винятком ультразвукової ударної обробки. Взаємна дифузія найчастіше призводить до фазоутворення, що змінює протікання переносу атомів із зростанням температури та швидкості пластичної деформації. В першу чергу, це проявляється при міграції в сталі елементів, схильних до утворення карбідів, зокрема, атомів хрому із покриття значної товщини [20]. В такому випадку замість проникнення атомів хрому у глибину сталі відбувається частковий розпад цементиту і утворення карбідів хрому між покриттям та сталевую підкладкою.

Висновки:

1. З ростом швидкості пластичної деформації відбувається не тільки збільшення рухливості атомів, але і зменшення відмінностей в значеннях коефіцієнтів дифузії в різних металах.

2. Простежується взаємозв'язок між характеристиками дифузійних процесів і механічними властивостями металів.

3. Подібна залежність швидкості пластичної деформації, дифузійних та механічних характеристик, коли відома одна з обчислених залежностей, дає можливість визначити показники іншої.

Література

1. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Тышкевич В.М., Фальченко В.М. Исследование массопереноса при импульсном воздействии / Зб. наук. праць «Диффузионные процессы в металлах». Тула: ТПИ – 1987. – С.107 – 112.
2. Герцрикен Д.С., Игнатенко А.И., Мазанко В.Ф. и др. Влияние типа твердого раствора на подвижность атомов в сплавах при ударном сжатии // Металлофиз. – 1990, –Т.12, № 2, – С. 67 – 71.
3. Герцрикен Д.С., Сергеева Ю.А., Тышкевич В.М., Фальченко В.М. Влияние высокоэнергетических импульсных воздействий на подвижность атомов в металлах при низких температурах / Зб. наук. праць «Физ. струк. и свойств тв.тел». Куйб.: КуГУ – 1987. – С. 3 – 12.
4. Мазанко В.Ф., Миронов Д.В., Герцрикен Д.С. и др. Диффузионные процессы при скоростном деформировании металлов в импульсном электромагнитном поле // Металлофиз. и новейш. технол. – 2007. – 29, № 2. – С. 173 – 192.
5. Арсенюк В.В., Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф. и др. Влияние дефектов кристаллической структуры на подвижность атомов в металлах при ударном сжатии // Металлофиз. и новейш. технол. – 2001. – 23, № 9. – С. 2203 – 2212.
6. Гаврилюк В.Г., Герцрикен Д.С., Полушкин Ю.А., Фальченко В.М. Механизм распада цементита при пластической деформации стали. // Физ. металлов и металловед. – 1981. – 51, вып. 1. – С. 147 – 151.
7. Лариков Л.Н., Беякова М.Н., Харченко Г.К. и др. Особенности деформирования соединений при скоростной сварке давлением. // Физ. и хим. обраб. матер. – 1978. – № 6. – С. 104 – 107.
8. Зукас Дж., Николас Т., Свифт Х.Ф. Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с.

Фазові перетворення

9. Герцрикен Д.С., Кривко В.П., Лариков Л.Н., Полоцкий И.Г., Прокопенко Г.И., Фальченко В.М. Ускорение диффузионных процессов при многократных ударных нагружениях // Физ. и хим. обраб. матер. – 1979. – № 4. С. 154 – 163.
10. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. Импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1991. – 205 с.
11. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Игнатенко А.И. и др. Определение длительности массопереноса и температуры импульсно деформируемого металла // Физ. металлов и металловед. – 2005. – Вып. 2. – С. 187 – 193.
12. Миронов В.М., Миронова О.А., Митлина Л.А. и др. Взаимосвязь импульсных деформаций и массопереноса в металлах // Физ. и хим. обраб. матер. – 2006. – № 4. – С. 77 – 83.
13. Ворона С.П., Мазанко В.Ф., Полищук Д.Ф., Фальченко В.М. Установка для ударного деформирования металлов. // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – № 4. – С. 196 – 198.
14. Хренов К.К., Чудаков В.А. Магнитноимпульсная сварка. // Авт. сварка. – 1972. – № 11. – С. 12 – 13.
15. Лариков Л.Н., Фальченко В.М., Герцрикен Д.С. и др. О механизме влияния импульсного магнитного поля на подвижность атомов в железе и алюминии // ДАН СССР. – 1978. – 239, № 2. – С. 312 - 314.
16. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 166 с.
17. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Миронова О.А. и др. Определение величины теплового эффекта при различных способах импульсной пластической деформации металлов // Доповіди НАНУ. – 2006. – № 8. – С. 119–126.
18. Тихонов Л.В., Кононенко В.А., Прокопенко Г.И., Рафаловский В.А. Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник: Механические свойства металлов и сплавов. – К.: Наук. Думка, 1985. – 568с.
19. Лариков Л.Н., Макара А.М., Назарчук А.Т., Фальченко В.М. О природе диффузионных процессов, ответственных за образование соединений при сварке в твердой фазе // Физ. и хим. обраб. матер. – 1971. – № 4. – С. 113 – 116.
20. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Тышкевич В.М., Фальченко В.М. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий. - Киев: РИО ИМФ НАНУ, 2001. – 444 с.
21. Чачин В.Н., Мелещенко Б.А., Тышкевич В.М. и др. Влияние импульсного магнитного поля и растягивающих напряжений на подвижность атомов никеля в меди // Весці АН БССР, сер. фіз-тэхн. – 1987. – С. 49 – 52.
22. Витман Ф.Ф., Златин Н.А., Иоффе Б.С. Сопротивление деформированию металлов при скоростях $10^{-6} - 10^2$ м/с // Журн. техн. физики. – 1949. – № 19, Вып. 3. – С. 300 – 314.

References

1. Gertsriken D.S., Mazanko V.F., Tyshkevich V.M., Falchenko V.M. *Zb. nauk. prats «Diffuzionnyye protsessy v metallakh»*. (Collection of articles scientific. "Diffusion Processes in Metals"). Tula: TPI, 1987, pp. 107 - 112. [in Russian].
2. Gertsriken D.S., Ignatenko A.I., Mazanko V.F. at al., *Metallofiz.*, 1990, 12, No. 2, pp. 67 - 71 [in Russian].

Фазові перетворення

3. Gertsriken D.S., Sergeeva Yu.A., Tyshkevich V.M., Falchenko V.M. *Zb. nauk. prats «Phys. structure and properties of solids»*, Kuib.: KuGU, 1987, pp. 3- 12 [in Russian].
4. Mazanko V.F., Mironov D.V., Gertsriken D.S. et al., *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2007, 29, No. 2, pp. 173 - 192 [in Russian].
5. Arsenyuk V.V., Gertsriken D.S., Mazanko V.F. et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2001, 23, No. 9, pp. 2203 - 2212 [in Russian].
6. Gavriilyuk V.G., Gertsriken D.S., Polushkin Yu.A., Falchenko V.M. *Fiz. metallov i metalloved.*, 1981, 51, Vol. 1, pp. 147 - 151 [in Russian].
7. Larikov L.N., Belyakova M.N., Kharchenko G.K. et al., *Fiz. i khim. obrab. mater.*, 1978, No. 6, pp. 104 - 107 [in Russian].
8. Zukas J., Nicholas T., Swift H.F. *Dinamika udara* (Impact dynamics), Moscow: Mir, 1985, 296 p. [in Russian].
9. Gertsriken D.S., Krivko V.P., Larikov L.N. et al., *Fiz. i khim. obrab. mater.*, 1979, No.4, pp. 154- 163 [in Russian].
10. Gertsriken D.S., Mazanko V.F., Falchenko V.M. *Impulsnaya obrabotka i massoperenos v metallakh pri nizkikh temperaturakh* (Impulse processing and mass transfer in metals at low temperatures), Kyiv: Nauk. dumka, 1991, 205 p. [in Russian].
11. Gertsriken D.S., Mazanko V.F., Ignatenko A.I. et al., *Phys. metals and metalloved.*, 2005, 99, No. 2, pp. 187 - 193 [in Russian].
12. Mironov V.M., Mironova O.A., Mitlina L.A. et al., *Fiz. i khim. obrab. mater.*, 2006, No. 4, pp. 77 - 83 [in Russian].
13. Vorona S.P., Mazanko V.F., Polishchuk D.F., Falchenko V.M., *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1986, No. 4, pp. 196 - 198 [in Russian].
14. Khrenov K.K., Chudakov V.A., *Avt. Svarka.*, 1972, No. 11, pp. 12 - 13 [in Russian].
15. Larikov L.N., Falchenko V.M., Gertsriken D.S. et al., *Doklady AN SSSR*, 1978, 239, No. 2, pp. 312 - 314 [in Russian].
16. Kudinov V.M., Koroteev A.Ya. *Svarka vzryvom v metallurgii* (Explosion welding in metallurgy), Moscow: Metallurgia, 1978, 166 p. [in Russian].
17. Gertsriken D.S., Mazanko V.F., Mironova O.A. et al., *Dopovidi NANU*, 2006, No. 8, pp. 119 - 126. [in Russian].
18. Tikhonov L.V., Kononenko V.A., Prokopenko G.I., Rafalovsky V.A. *Struktura i svoystva metallov i splavov. Spravochnik: Mekhanicheskiye svoystva metallov i splavov* (Structure and properties of metals and alloys. Handbook: Mechanical properties of metals and alloys), Kyiv: Nauk. Dumka, 1985, 568 p. [in Russian].
19. Larikov L.N., Makara A.M., Nazarchuk A.T., Falchenko V.M., *Fiz. i khim. obrab. mater.*, 1971, No. 4, pp. 113 - 116 [in Russian].
20. Gertsriken D.S., Mazanko V.F., Tyshkevich V.M., Falchenko V.M. *Massoperenos v metallakh pri nizkikh temperaturakh v usloviyakh vneshnikh vozdeystviy* (Mass transfer in metals at low temperatures under conditions of external influences), Kyiv: RIO IMF NANU, 2001, 444 p. [in Russian].
21. Chachin V.N., Meleschenko B.A., Tyshkevich V.M. et al., *Vestsi AN BSSR*, 1987, pp. 49 - 52 [in Russian].
22. Vitman F.F., Zlatin N.A., Ioffe B.S., *Zhurn. tekhn. Fiziki*, 1949, 19, Vol. 3, pp. 300 - 314 [in Russian].

Одержано 28.09.20

D. S. Gertsriken, A. M. Husak, V. F. Mazanko, S. Ie. Bogdanov

The deformation rate, atomic mobility and mechanical properties of metals

Summary

The dependences of diffusion coefficients in metals with different crystal lattice (b.c.c., f.c.c., h.c.p., b.c.t.), subjected to pulse effects by different types of processing in a wide range of strain rates (10^{-2} - 10^6 s⁻¹) without heating and at $T < 0,5 T_p$ studied by methods based on the use of radioactive indicators ⁵⁵Fe, ⁹⁵Nb, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ⁶³Ni, ²⁶Al, ⁴⁴Ti (layer-by-layer radiometric analysis of residual integral activity, macro- and microautoradiography). Used such types of processing as ultrasonic shock treatment, diffusion welding, shock load, magnetic pulse processing, etc. On the same materials subjected to the same types of processing, mechanical characteristics (impact strength, microhardness, tensile strength, etc.) were determined. In addition, literature data related to the determination of some mechanical characteristics in the deformation of metals at different speeds were used.

It turned out that with increasing the rate of plastic deformation there is not only an increase in the mobility of atoms, but also a decrease in differences in the values of the diffusion coefficients of intrinsic atoms and other diffusers in different metals. Despite the large difference in melting temperatures, in particular zinc and niobium, their self-diffusion coefficients in the migration of atoms without heating at a rate of 10^6 s⁻¹ differ only 1.5 times, while at 1 s⁻¹ the difference in the mobility of atoms is 4 orders of magnitude.

It is shown that the velocity dependences of diffusion and mechanical characteristics can be rectilinear, have extremum or inflection, but they will be approximately the same for diffusion coefficients and parameters that characterize the mechanical properties of metals under impulse loads.

Establishing the type of velocity dependences for diffusion and mechanical characteristics makes it possible to determine intermediate and extrapolated values for both characteristics, as well as on the schedule of one dependence to predict the shape of the other with a certain accuracy.

Keywords: radioactive isotopes, self- and heterodiffusion, pulse loads, strain rate, mechanical characteristics.