

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ОБРАБОТКИ И ПОДВИЖНОСТЬ АТОМОВ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

В.Ф. Мазанко<sup>1)</sup>, Д.С. Герцрикен<sup>1)</sup>, Н.В. Зайцева<sup>1)</sup>, С.Е. Богданов<sup>1)</sup>,  
Д.В. Миронов<sup>2)</sup>, В.М. Миронов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины,  
бул. Вернадского 36, 01680 Киев, Украина, deciatinka@gmail.com

<sup>2)</sup>Самарский государственный аграрный университет,  
ул. Учебная 2, 446442 п. Усть-Кинельский, Самарская обл., Россия, dvonorim@mail.ru

С помощью методов, основанных на использовании радиоактивных изотопов, изучено влияние пластической деформации на диффузию в ряде металлов и их механические свойства. Показано, что с ростом скорости пластической деформации происходит увеличение подвижности атомов и уменьшение различий в значениях коэффициентов диффузии собственных и примесных атомов в различных металлах. Обнаружена взаимосвязь между скоростными зависимостями диффузионных и механических характеристик.

**Ключевые слова:** миграция; диффузия; механические свойства, скоростная пластическая деформация.

## THE INFLUENCE OF THE STRAIN RATE ON THE DEFORMATION FEATURES IN VARIOUS TYPES OF PROCESSING AND THE MOBILITY OF ATOMS IN METALS AND ALLOYS

V.F. Mazanko<sup>1)</sup>, D.S. Gertsriken<sup>1)</sup>, N.V. Zaitseva<sup>1)</sup>, S.E. Bohdanov<sup>1)</sup>,  
D.V. Mironov<sup>2)</sup>, V.M. Mironov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>The Physics of Metal Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
36 Vernadsky Ave., 01680 Kiev-142, Ukraine, deciatinka@gmail.com

<sup>2)</sup>Samara State Agrarian University,  
2 Uchebnaya Str., 446442 Ust-Kinelsky village by the Samara province, Russia, dvonorim@mail.ru

The effect of plastic deformation on diffusion in a number of metals and their mechanical properties was studied. It is shown that with an increase in the rate of plastic deformation, an increase in the mobility of atoms and a decrease in the differences in the diffusion coefficients of own and impurity atoms in various metals. A relationship was found between the velocity dependences of diffusion and mechanical characteristics.

**Keywords:** migration; diffusion; mechanical properties; high-speed plastic deformation.

### Введение

Известно, что подвижность атомов в импульсно деформированных металлах существенно зависит от скорости пластической деформации,  $\text{с}^{-1}$ . Более того, как показано в работе [1], какую бы форму не имела скоростная зависимость само- и гетеродиффузии: прямолинейную, с экстремумом или с точкой перегиба, зависимость механических свойств описывается аналогичной функцией. Следовательно, наблюдается корреляция между их зависимостями от скорости деформации.

### Результаты и их обсуждение

Особенности миграции атомов в импульсно деформируемых металлах (ОЦК - Fe, Mo, Nb, W; ГПУ - Co, Zn, Ti; ГЦК - Ni, Cu, Al, ГЦТ - Sn) изучали методами, основанными на применении радиоактивных индикаторов (<sup>55</sup>Fe, <sup>95</sup>Nb, <sup>60</sup>Co, <sup>65</sup>Zn, <sup>63</sup>Ni, <sup>26</sup>Al, <sup>44</sup>Ti).

Для деформирования металлов в широком интервале скоростей деформации ( $\dot{\epsilon}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ) применяли различное оборудование: установку для диффузионной сварки ( $1 \cdot 10^{-2}$  -  $0.1 \text{ с}^{-1}$ ); прокатный стан ДУО 170

( $1 \cdot 10^2 - 20 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ ); установку для ударной сварки в вакууме УСВ ( $0.5 - 300 \text{ c}^{-1}$ ), позволяющую осуществлять импульсное нагружение с помощью удара по образцу свободно падающим или разгоняемым грузом; специально сконструированное устройство для ударного нагружения металлов ( $10^2 - 10^3 \text{ c}^{-1}$ ), импульсное воздействие, в котором осуществляется деформация горизонтально летящим снарядом; установку МИУ-23, принцип нагружения в которой заключается в соударении внутреннего образца с разгоняемым в импульсном электромагнитном поле внешним образцом ( $5 \cdot 10^2$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ ); сварочный комплекс, осуществляющий сварку за счет энергии взрыва ( $10^5 - 10^6 \text{ c}^{-1}$ ).

Как показали проведенные эксперименты (рис. 1), увеличение скорости деформации приводит к уменьшению разности кривых напряжение-деформация, полученных при различных обработках, и при  $\dot{\epsilon} \geq 1 \text{ c}^{-1}$  они становятся практически одинаковыми. Аналогичным образом, начиная примерно с таких значений  $\dot{\epsilon}$ , коэффициенты массопереноса (диффузии) при различных способах нагрузки укладываются на прямолинейную зависимость (в логарифмических координатах) КД от скорости деформации (рис. 2а) и при одинаковых значениях  $\dot{\epsilon}$  также одинаковыми становятся величины  $D_M$  при прокатке и ударном сжатии.

Следует заметить, эта закономерность (перекрывания интервалов значений  $Q_{ef}$  для различных способов обработки) имеет место и для энергии активации даже при значительно меньших скоростях деформации (рис. 2б).

Рис. 3 и табл. 1, 2 иллюстрируют влияние скорости деформации на уменьшение различий в подвижности атомов в металлах и твердых растворах различного типа. Причем этот эффект наблюдается при разных температурах, начиная от комнатной. Более того, постепенно уменьшается и почти исчезает разница между КД при проникновении в железо и медь или алю-

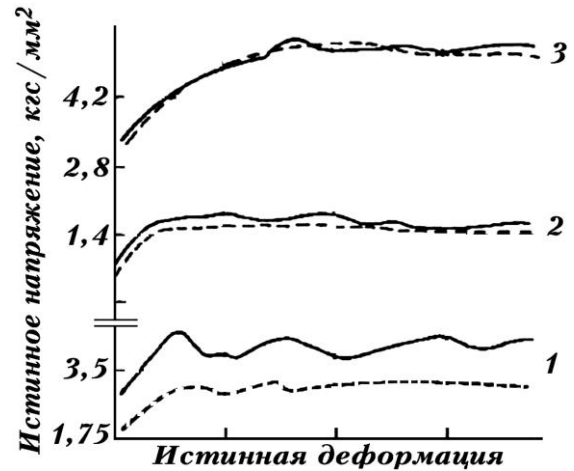


Рис. 1. Кривые напряжение-деформация, полученные при различных обработках (сплошная кривая – растяжение, штриховая – кручение) с  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (1),  $4 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$  (2),  $2.5 \text{ c}^{-1}$  (3)

Fig. 1. Stress-strain curves obtained during various treatments (solid curve – tension, dashed curve – torsion) with  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (1),  $4 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$  (2),  $2.5 \text{ c}^{-1}$  (3)

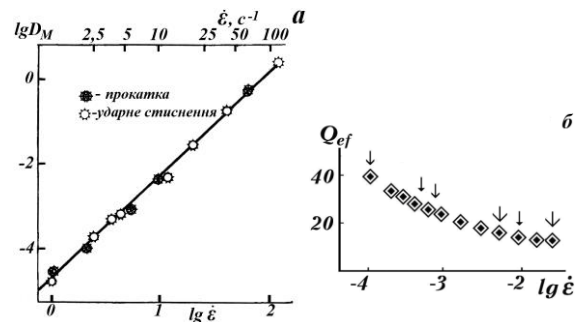


Рис. 2. Зависимость коэффициентов самодиффузии железа (а) и энергии активации (б) от скорости деформирования разными способами

Fig. 2. Dependence of the iron self-diffusion coefficients (a) and activation energy (b) on the deformation rate in various ways

миний и вольфрам. Однако даже при  $10^6 \text{ c}^{-1}$  есть заметная разница в подвижности собственных и примесных атомов в твердых растворах внедрения.

Таким образом, с увеличением скорости деформации имеет место сближение механических свойств при различных обработках и эффект нивелирования природы диффузанта и деформированного материала.

### Заключение

Анализ результатов показывает, какую бы форму не имела скоростная зависимость са-

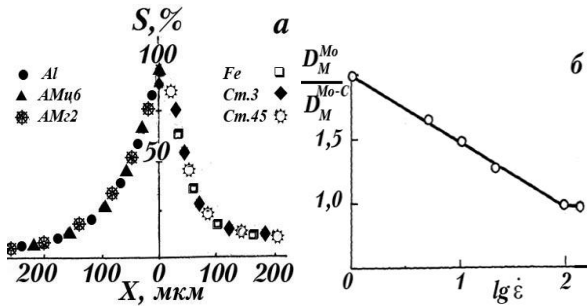


Рис. 3. Совпадение распределения атомов  $^{55}\text{Fe}$  в объеме сваренных при  $\dot{\epsilon}$   $5 \cdot 10 \text{ c}^{-1}$  железа и его сплавов и алюминия и его сплавов (а) и сближение КД углерода  $^{14}\text{C}$  в молибдене и твердом растворе внедрения С в Мо с ростом  $\dot{\epsilon}$  (б)

Fig. 3. The coincidence of the distribution of  $^{55}\text{Fe}$  atoms in the volume of iron and its alloys and aluminum and its alloys welded at  $\dot{\epsilon}$   $5 \cdot 10 \text{ c}^{-1}$  (а) and the convergence of the CD of carbon  $^{14}\text{C}$  in molybdenum and the solid solution of the introduction of C in Mo with the growth  $\dot{\epsilon}$  (б)

Таблица 1. Влияние скорости пластической деформации на проникновение атомов  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{85}\text{Kr}$  в железо и твердый раствор аргона в железе при 300 К ( $D_M, \text{cm}^2/\text{c}$ )

Table 1. Effect of the rate of plastic deformation on the penetration of  $^{55}\text{Fe}$  and  $^{85}\text{Kr}$  atoms into iron and a solid solution of argon in iron at 300 K ( $D_M, \text{cm}^2/\text{s}$ )

$\dot{\epsilon}, \text{c}^{-1}$	Железо		Железо-аргон	
	$^{55}\text{Fe}$	$^{85}\text{Kr}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{85}\text{Kr}$
0.2	$1.8 \cdot 10^{-8}$	$3.1 \cdot 10^{-10}$	$2.0 \cdot 10^{-9}$	$\sim 1 \cdot 10^{-11}$
50	$5.1 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-7}$
$4 \cdot 10^2$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$9.8 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$
$3 \cdot 10^3$	15.5	3.5	10.0	2.0
$4 \cdot 10^5$	10.1	2.6	7.1	1.5
$10^6$	28.0	7.5	20.0	6.6

Таблица 2. Отношение подвижности атомов элементов, образующих твердые растворы замещения, в различных металлах в условиях высокоскоростной деформации

Table 2. The ratio of the mobility of the atoms of elements forming solid solutions of substitution in various metals under conditions of high-speed deformation

T, K	*Me	$\sim \dot{\epsilon}, \text{c}^{-1}$	1	10	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
293	$^{63}\text{Ni}$	$D_M^{\text{Fe}} / D_M^{\text{Cu}}$	6.7	3.6	1.6	0.85	1	1	1
373	$^{63}\text{Ni}$	$D_M^{\text{Co}} / D_M^{\text{Sn}}$	49	21	8	1.8	1	1	1
573	$^{55}\text{Fe}$	$D_M^{\text{Zn}} / D_M^{\text{Nb}}$	10000	4200	650	14	10	4.5	1.4
823	$^{55}\text{Fe}$	$D_M^{\text{Al}} / D_M^{\text{W}}$	29210	9850	1005	155	65	17	2

мо- и гетеродиффузии: прямолинейную, с экстремумом или с точкой перегиба, зависимость механических свойств от скорости описывается аналогичной функцией. Следовательно, можно сделать следующие выводы: с ростом скорости пластической деформации происходит не только увеличение подвижности атомов, но и уменьшение различий в значениях коэффициентов диффузии в различных металлах; прослеживается взаимосвязь между скоростными зависимостями диффузионных и механических характеристик.

### Библиографические ссылки

- 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; 28(2): 173-192.
- 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): 2203-2212.
- Миронов Д.В., Миронов В.М., Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф. Массоперенос в металлах при действии магнитных полей и импульсных деформаций. Самара: РИЦ СГСКХА, 2011. 276 с.

### References

- Mazanko V.F., Mironov D.V., Gertsriken D.S. i dr. Diffusion processes in the high-speed deformation of metals in a pulsed electromagnetic field // *Metallofiz. i noveysh. tekhnol.* 2007; 28(2): 173-192. (In Russian).
- Arsenyuk V.V., Gertsriken D.S., Mazanko V.F. i dr. Effect of crystal structure defects on the mobility of atoms in metals under shock compression. *Metallofiz. i noveysh. tekhnol.* 2001; 23(9): 2203-2212. (In Russian).
- Mironov D.V., Mironov V.M., Gertsriken D.S., Mazanko V.F. Mass transfer in metals under the action of magnetic fields and pulsed deformations. Samara: RITs SGSKhA, 2011. 276 p. (In Russian).