

Сила торможения пары дислокаций неподвижными дислокациями благодаря давлению значительно возрастает

$$F = F(0)(1 + Kp)^{\frac{3}{2}}; \quad F(0) = \frac{nb^4\tilde{\mu}^2}{16m\omega_0(1-\tilde{\gamma})^2\nu} \quad (6)$$

Знак  $\sim$  указывает на то, что значения соответствующих величин взяты для гидростатически сжатого кристалла.

Наиболее сильно влияние гидростатического сжатия проявляется в щелочно-галоидных кристаллах. Например, при давлении  $10^9$  Па в кристаллах иодида калия сила торможения дислокационной пары неподвижными дислокациями возрастает в полтора раза.

### Список литературы

1. Альшиц В.И., Инденбом В.Л. // УФН.-1975.-Т. 115, № 1.-С. 3-39.
2. Каганов М.И., Кравченко В.Я., Нацик В.Д. // УФН.-1973.-Т.111, №4.-С.655- 682.
3. Барьяхтар В.Г., Друинский Е.И. // ЖЭТФ.-1977.-Т.72, №1.- С. 218-224.
4. Kaneda T. // J. Phys. Soc. Japan.-1970.-V.28, №5.-P.1205-1211.
5. Natsik V.D., K.A. Chishko K.A. // Crystal Res. and Technol.-1984.-V. 19, № 6.- P.763.
6. Malashenko V.V., Sobolev V.L., Khudik B.I. // Phys. stat. sol. (b).-1987.- Vol.143, №2. -P. 425-431.
8. Малашенко В.В. // ФММ.-2005.-Т.100, №6.-С. 1-4.
9. Хирт Д., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Наука, 1972.- 599 с.
10. 9. Малашенко В.В. // ФТТ.-2006.- Т.48, №3.-С.433-435.
11. Токий В.В., Зайцев В.И. // ФТТ.- 1973.- Т.15, № 8.- С.2460-2467.
12. Косевич А.М., Токий В.В., Стрельцов В.А. // ФММ.- 1978.- Т.45, № 6.- С. 1135.
13. Малашенко В.В. // ЖТФ.-2006.-Т.76,№6.-С.127-129.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИКЕЛЯ И МОЛИБДЕНА С ГАЗАМИ ВОЗДУХА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ

Герцирикен Д. С., Мазанко В. Ф., Чао Шенжу, Чжан Цженю, Миронов Д. В.,  
Миронов В. М.

*Институт металлофизики им. Г.В.Курдюмова НАНУ, Киев, Украина,  
[dina\\_izotop@mail.ru](mailto:dina_izotop@mail.ru)*

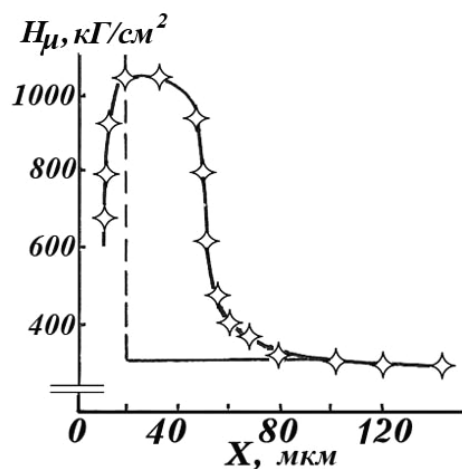
*Северо-западный политехнический университет, Сиань, Китай, [blao@nwpu.edu.cn](mailto:blao@nwpu.edu.cn)  
Самарская государственная сельскохозяйственная академия, п. Усть-  
Кинельский Самарской обл., Россия,  
[dvonorim@mail.ru](mailto:dvonorim@mail.ru)*

Ранее было показано, что в результате воздействия на металл искровых разрядов происходит введение в металл и дальнейшая миграция атомов не только анода и поверхностного слоя, но и среды, в которой осуществляется обработка [1,2]. Неконтролируемое проникновение атомов (и молекул) среды может ухудшить требуемые состав и свойства обработанного материала. Однако целенаправленное применение газовой среды заданного состава способно привести к дополнительному повышению качества изделия.

Рассмотрим особенности фазообразования при электроискровом легировании (ЭИЛ). При одновременном насыщении поверхности титана никелем (материал анода или покрытие на титане) с азотом (среда), согласно данным рентгеноструктурного анализа, в зоне взаимодействия возникают фазы в следующем порядке: нитрид никеля;

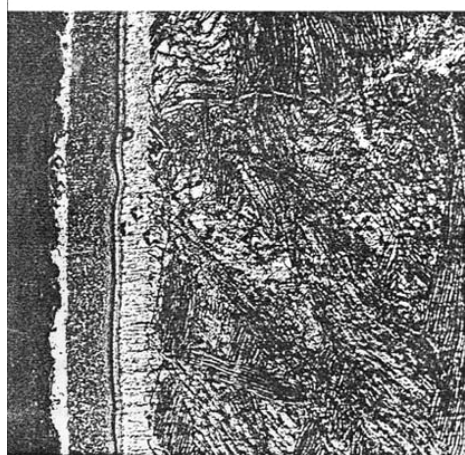
твердый раствор азота и титана в никеле и, наконец, твердый раствор обоих легирующих элементов (металла и неметалла) в титане (рис. 1).

При этом микротвердость  $H_{\mu}$  изменяется таким образом, что повторяет форму концентрационного профиля распределения легирующих элементов в титановом сплаве, а в приповерхностном слое  $H_{\mu}$  достигает

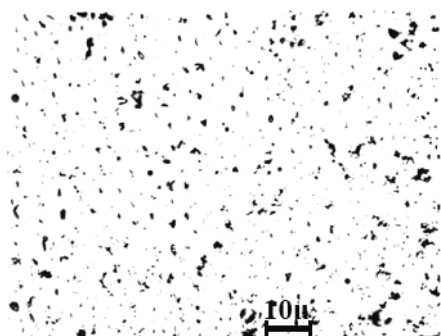


$\sim 1100 \text{ кг/мм}^2$ , т.е. увеличивается в  $\sim 2$  и  $3$  раза по сравнению с никелем и титаном соответственно.

С ростом энергии искрового разряда и длительности обработки увеличивается глубина проникновения никеля и азота, концентрационный профиль и распределение  $H_{\mu}$  спадает с глубиной более полого, но максимальные значения концентрации и микротвердости практически не изменяются. Трибологические испытания показали, что в тонком приповерхностном слое (до  $X \cong 5-7$  мкм) стойкость к истиранию незначительна. Затем на протяжении  $10-25$  мкм износостойкость практически не изменяется и является максимальной для каждого режима ЭИЛ. На больших глубинах износостойкость резко падает.



**Рис. 1.** Изменение микротвердости по глубине диффузионной зоны после ЭИЛ ( $E_{II}=0,9$  Дж,  $\tau_{II}=200$  мкс)



**Рис. 2.** Авторадиограмма-реплика поверхности никеля после ЭИЛ в Ag и Kt,  $6,4$  Дж,  $100$  мкс.

При обработке на воздухе в твердых растворах внедрения помимо азота присутствуют атомы кислорода и аргона (по данным активационной автордиографии), в то же время окислы отсутствуют даже на поверхности (в слое  $\sim 200$  нм). И, как показали результаты электронномикроскопической автордиографии при использовании меченых атомов криптона  $^{85}\text{Kr}$ , смешанных с аргоном, в диффузионной зоне появляются мелкодисперсные  $\sim 1-3$  мкм газонаполненные поры (рис. 2), количество и размер которых резко спадает с глубиной. На расстоянии до  $20$  мкм от поверхности наблюдаются считанные поры, тогда как твердый раствор переменной концентрации инертного газа в никеле простирается на расстояние более  $40$  мкм. Тем не менее, наличие атомов инертных газов практически не сказывается на механических характеристиках металла, начиная от глубин  $\sim 10-15$  мкм в зависимости от параметров обработки. Ближе к поверхности износостойкость еще меньше, чем при обработке в чистом азоте.

Обработка никеля никелевым анодом в среде углекислого газа  $\text{CO}_2$ , меченого по углероду  $^{14}\text{C}$ , приводит к образованию в диффузионной зоне на протяжении  $50-75$  мкм при энергии импульса от  $0,9$  до  $6,4$  Дж концентрационного профиля с переменной концентрацией углерода, в приповерхностном слое до  $5$  мкм — пересыщенного твердого раствора внедрения с максимальным содержанием углерода  $\sim 3\%$ . В равновесных условиях максимальная концентрация углерода в никеле при  $1326^\circ\text{C}$  не превышает  $2,7$  ат. % [3]. Аналогичные результаты (значения максимальных концентрации на поверхности —  $3,05$  ат. % и глубины проникнове-

ния – 78–80 мкм) получены при электроискровой обработке никеля в среде метана, меченого по углероду.

Исследование фазового состава обработанного на воздухе молибдена молибденовым анодом показало, что так же, как и на никеле, не происходит образования окислов. Проникновение в глубь атомов кислорода, азота, аргона приводит только к появлению твердого раствора внедрения с сохранением ОЦК-симметрии молибдена, нитрида молибдена  $\text{Mo}_2\text{N}$  с сохранением тетрагональной симметрии и нарушением стехиометрии (избыток азота), следов карбида  $\text{Mo}_2\text{C}$  с ромбической решеткой и незначительного количества пор диаметром до 1 мкм, содержащих инертный газ.

Рассмотрим нанесение на воздухе молибдена на железо и стали. Рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный анализы молибденовых покрытий на стали 45 показали, что под действием ЭИЛ возникает диффузионная зона с большим количеством фазовых составляющих. Кроме исходных молибдена, твердого раствора углерода в железе и цементита (в несколько меньшем количестве в связи с его частичным распадом) в ней присутствуют твердые растворы замещения железа в молибдене и молибдена в железе, небольшое количество твердых растворов внедрения азота и углерода в молибдене и азота в железе, фазы внедрения: нитриды и карбиды молибдена, а также следы нитридов железа ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ,  $\text{Fe}_2\text{N}$ ), причем только при малых значениях энергии разряда. С увеличением энергии разряда растер толщина покрытия, о чем свидетельствует, в частности, уменьшение интенсивности дифракционных максимумов железа, и заметно возрастает содержание нитридов молибдена, в то время как количество карбидов изменяется незначительно (таблица).

**Таблица.** Влияние энергии разряда на содержание фаз в диффузионной зоне

Фазы	Mo	$\alpha$ -Fe	$\alpha$ -Mo	$\text{Mo}_2\text{N}$	$\text{Mo}_2\text{C}$
	$E$ , Дж		Относительная концентрация $C$ , %		
0,3	100	20	10	< 1	< 1
0,9	100	4	12	10	< 1
3,1	100	0	15	15	< 1
6,4	100	0	15	15	1

Это отличие может быть вызвано разными механизмами формирования фаз – появление азота в покрытии связано с его захватом из воздуха при ионизации молекул  $\text{N}_2$  в плазме искрового разряда, тогда как поступление атомов углерода лимитировано преимущественно его концентрацией в стали. Так, при обработке по тому же режиму стали 3, содержащей меньшее количество  $C$ , в диффузионной зоне только при значении  $E_{II} = 6,4$  Дж можно увидеть следы  $\text{Mo}_2\text{C}$ . При меньших энергиях дифракционные максимумы, соответствующие данной фазе, находятся на уровне фона. При взаимодействии молибдена с железом карбиды молибдена рентгеноструктурным методом не выявляются вообще, по-видимому, в связи с образованием цементита. Что же касается отсутствия нитридов железа при обработке с энергией разряда, превышающей 0,3 Дж, то это связано с тем, что с увеличением толщины формирующегося покрытия атомы азота не успевают проникнуть за время обработки в основной металл в количестве, достаточном для образования нитридов. Содержание твердого раствора азота в железе при 0,9 Дж также становится незначительным, причем это имеет место даже при обработке молибденовым анодом железа, не содержащего атомов углерода, которые могут препятствовать проникновению атомов других элементов при импульсной обработке [4]. Отметим, что возрастание величины энергии разряда также приводит к большей гомогенизации всех образовавшихся фаз. В покрытии и диффузионной зоне отсутствуют интерметаллические соединения железа и молибдена, несмотря на их появление в данной системе в равновесных условиях изотермических отжигов [3]. Однако при нанесении тонкого слоя молибдена на чистое железо в слое протяженностью  $\sim 2000$  нм от по-

верхности помимо твердых растворов было обнаружено небольшое количество соединения  $Fe_xMo_{1-x}$ . Его оказалось недостаточно для определения симметрии и сопоставления с интерметаллидом  $Fe_2Mo$  ( $\lambda$ -фаза). При обработке по такому же режиму тонкопленочного ( $\sim 1000$  нм) исходного гальванического покрытия  $^{57}Fe$ , находящегося на монокристаллическом молибдене, молибденовым анодом, на поверхности возникает твердый раствор железа в молибдене и интерметаллическое соединение  $Fe_xMo_{1-x}$ , где  $x < 0,66$ . На глубине  $\sim 1500$  нм выявляется твердый раствор молибдена в  $\alpha$ -Fe в виде фаз, размером порядка 15 нм.

При нанесении Fe покрытия на Mo возникают сходные фазы. При энергии разряда 6,4 Дж появляются твердые растворы с таким же содержанием растворенного элемента, нитриды железа и молибдена, интерметаллическое соединение с нарушенной стехиометрией  $Fe_{1,9}Mo$ . Карбидные фазы не возникают, как и в случае взаимодействия молибдена со сталями, поскольку количество углекислого газа в воздухе незначительно по сравнению с азотом, а других источников поступления атомов углерода в покрытие и основной металл нет. Кроме того, на поверхности железного покрытия обнаруживаются атомы кислорода – порядка 12 ат.% кислорода, не связанного в окислы. Можно предположить, что кислород находится в виде пересыщенного твердого раствора в железе и в растворе молибдена в  $\alpha$ -Fe.

### Список литературы

1. Герцрикен Д.С. Взаимодействие железа с газами воздуха под действием искровых разрядов /Д.С.Г ерцрикен, В.Ф.Мазанко, Чао Шенжу, Чжан Цженю, Д.В. Миронов, Т.В. Миронова. // Материалы 8-ой международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23-25 сентября 2009 г., Минск, Беларусь. – Минск: «Издательский центр БГУ», 2009, С. 24-26.
2. Герцрикен Д.С. Взаимодействие меди с газами воздуха под действием искровых разрядов. /Д.С.Г ерцрикен, В.Ф.Мазанко, Чао Шенжу, Чжан Цженю, Д.В. Миронов, Т.В. Миронова. // Там же, С. 27-29.
3. ASM Handbook Volume 3 Alloy phase diagrams ASM International 1992.
4. Герцрикен, Д.С. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий. /Д.С. Герцрикен, В.Ф. Мазанко, В.М. Тышкевич, В.М. Фальченко — Киев: РИО ИМФ НАН Украины, 1999. - 436 с.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ МЕТАЛЛАХ

**Миронов В. М., Миронов Д. В., Герцрикен Д. С., Лопата Л.А., Бевз В. П.**

*Самарская государственная сельскохозяйственная академия, п. Усть-Кинельский*

*Самарской обл., Россия, [dvonorim@mail.ru](mailto:dvonorim@mail.ru)*

*Институт металлофизики им. Г.В.Курдюмова НАНУ, Киев, Украина,*

*[dina\\_izotop@mail.ru](mailto:dina_izotop@mail.ru); [BevzV@ukr.net](mailto:BevzV@ukr.net)*

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина, [beryuza@ukr.net](mailto:beryuza@ukr.net)*

Одновременное действие пластической деформации и импульсов электрического тока используется при различных видах химико-термической обработки [1].

Рассмотрим перенос вещества при электроконтактном припекании. Оно осуществляется под импульсным давлением при прямом пропускании электрического тока до 8...30 кА, вторичным напряжением 1...6 В, давлением до 100 МПа, временем импульса 0,04...0,2 с, временем паузы 0,04...0,2 с., высокими скоростями нагрева, которые могут достигать  $10^3 \dots 10^4$  К/с. Результаты исследований показывают, что за время действия синхронизированных импульсов тока и давления, в результате реализации электропла-