

# Определение параметров субмикроструктуры электрохимических покрытий по их дилатации

Г. В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель

*Брянская государственная сельскохозяйственная академия,  
Брянская обл., с. Кокино, 243365, Россия, e-mail: [YPK2@mail.ru](mailto:YPK2@mail.ru)*

Установлены зависимости прочностных свойств железных покрытий от параметров микроструктуры металла при электроосаждении и термической обработке, характеризуемой дилатацией. Исследовано влияние высокотемпературного воздействия на прочность и структуру покрытий. Показано, что в качестве контрольного параметра прочностных свойств железа можно использовать дилатацию.

*Ключевые слова: композиционные электрохимические покрытия, электролитические сплавы, структура, механические свойства, износостойкость, дисперсная фаза.*

УДК 631.3.004.67:621.35.035.4

## ВВЕДЕНИЕ

Связь физико-механических свойств покрытий со структурой осадков была предметом исследований, предпринятых в Институте прикладной физики АН МССР учеными школы академика Ю.Н. Петрова, в число которых входил и один из авторов. С учетом обобщения своих и данных других исследователей была разработана теория генезиса дефектов структуры железа [1–3]. Основой разработки послужили исследования Ю.Н. Петрова, В.С. Мамонтова, А.М. Козлова, А.Е. Ташкина, В.В. Карякина, В.С. Калмуцкого, В.К. Андрейчука, А.М. Андреевой, В.Ф. Гологана, А.М. Шайдулина, П.М. Мелкова, А.Н. Швецова, А.В. Митрякова и др. Эта теория явилась базисом для разработки структурно-энергетической теории формирования механических свойств электролитического железа, позволившей объяснить происхождение его так называемых особых физико-механических свойств. Полученные при этом аналитические выражения связи физико-механических свойств железа с основными параметрами его субструктуры (величиной блоков мозаики, плотности дислокаций, субмикротрещиноватостью), как показал анализ, достаточно достоверно совпадают с результатами исследования не только для электролитического, но и для пирометаллургического железа [3]. Этот результат – объективное отражение единства природы металла, каким бы способом его ни получали, и зависимости его структурно-чувствительных свойств от особенностей формирования структуры, вызванных развитием пластической деформации кристаллов в процессе деформирования покрытия. Он отражает наличие глубокой аналогии и реальной физической связи между фазовыми превращениями и пластической деформацией (образованием и перемещением дефектов, в первую очередь дислокаций), кото-

рая определяет характер развития превращения [4, 5]. Целесообразность такого подхода для местного анализа структуры и свойств электролитических и пирометаллургических металлов подтверждена рядом работ, опубликованных в последнее время [6–11 и др.].

В технике используются главным образом гетерофазные кристаллические материалы. Поликристаллы, состоящие из различно ориентированных областей одной и той же фазы, разделенные границами, можно рассматривать как их частный случай. Фазовые превращения в них связаны с изменением атомно-кристаллической структуры, характеризуемым вкладом, вносимым в него различными типами дефектов. В совершенном (идеальном) кристалле, который можно представить как бесконечную совокупность атомов, плотно упакованных в пространстве, дефекты отсутствуют. Соответственно теоретическая плотность вещества определяется его молекулярной массой и объемом. Например, для химически чистого железа при комнатной температуре она равна  $7,879 \text{ г/см}^3$  [3]. Плотность реальных кристаллов изменяется в сравнении с теоретической на величину дилатации, устанавливаемой экспериментально и зависящей от вклада дефектов. При этом рассматриваются чистые электролитические или пирометаллургические материалы, в которых доля посторонних элементов весьма незначительна или строго контролируема. Действительно, при подготовке гальванических ванн и электролизеров предпринимают специальные меры по очистке солей и электролитов от посторонних примесей. Следовательно, электролитические сплавы из круга анализируемых материалов должны быть исключены. Дилатация, определяемая относительной плотностью реального материала (в сравнении с теоретической) или относительным объемом, может характеризовать его общую дефектность и служить для

оценки вклада в нее отдельных дефектов, следовательно, в формирование тонкой структуры. Поэтому целью исследований явился поиск непосредственной связи дилатации с параметрами структуры и физико-механическими свойствами электролитических покрытий.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ взаимозависимости субмикроструктуры электролитического железа и свойств, связанных с ней, с его дилатацией проводили на основе собственных исследований [12, 13] материалов по изучению зависимости этих характеристик от условий электролиза, изложенных в работах [14, 15 и др.]. В исследованиях использовали осадки электролитического железа, полученные из хлористого ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  – 400–600 кг/м<sup>3</sup>) и сернокислого ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 400–450 кг/м<sup>3</sup>) электролитов железнения при режимах электролиза:  $\text{pH} = 0,1\text{--}2,4$ ;  $D_k = 5\text{--}50$  А/дм<sup>2</sup>;  $T = 20\text{--}90^\circ\text{C}$ . Рентгеноструктурный анализ проводили на установках типа ДРОН-3М по методике [16]. Основные механические методы изучения свойств покрытий включали: измерение микротвердости  $H_{\mu}^{100}$  по ГОСТ 9450–76 ( $H_{\mu}$ ), упругих свойств (динамическим резонансным методом) [15, 17], прочность покрытий на растяжение (метод разрыва колец из материала покрытия) [15]. Плотность железных осадков  $\gamma$  определяли методом гидростатического взвешивания образцов по изучению модуля упругости и предела прочности [18]. Дилатацию – как  $\delta = (\gamma_t - \gamma) / \gamma_t$ , где  $\gamma_t$  – теоретическая плотность бездефектного железа. Для построения функциональных зависимостей использовали регрессионный анализ [19].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приступая к анализу условий происхождения и формирования дефектов структуры электролитических железных покрытий с целью установления закономерностей изменения механических свойств, нет смысла давать подробное описание встречающихся в них дефектов, которые подробно описаны в работах [20–22]. Все нарушения укладки атомов в решетке (дефекты структуры) – точечные, одномерные, а также трехмерные (например, микропоры), по определению относящиеся к микроструктуре и не требующие анализа на атомном уровне, неизбежно приводят к дилатации и изменению плотности металла. Таким образом, для оценки общей дефективности материалов при рассмотрении данной проблемы одним из главных параметров, характери-

зующих субмикроструктуру покрытий, является дилатация.

Теоретическую плотность металла, имеющего идеальную кристаллическую решетку, можно установить довольно точно [20]. Все нарушения укладки атомов в решетке неизбежно приводят к изменению плотности и объема металлов (дилатации). Соответственно вклад дефекта в изменение удельного объема или плотности металла может послужить оценкой значимости вклада вида дефектов в изменение его субмикроструктуры. Например, равновесная концентрация вакансий в металлах  $C_v$  определяется как отношение числа вакансий в решетке  $n$  к общему числу узлов в  $N$ . Концентрация вакансий зависит от температуры нагрева и достигает наибольшей величины при точке плавления [20]:

$$C_v = A \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_v}{\alpha_{пл} \Theta}\right), \quad (1)$$

где  $A$  – константа, зависящая от типа решетки;  $\alpha_v$  – энергия вакансии;  $\alpha_{пл}$  – энергия плавления вакансии;  $\Theta$  – сходственная температура.

Таким образом, определяемая с помощью выражения (1) максимальная концентрация вакансий для электролитического железа  $C_v = 10^{-3}\text{--}10^{-6}$  (при  $\alpha_{пл} = 0,019\text{--}0,04$ ,  $\alpha_v = 0,25$  [20]). Соответственно наибольшая дилатация (изменение объема и плотности) за счет вакансий  $\delta_v = \Delta V/V = \Delta \gamma/\gamma \approx n/N = 10^{-3}$ . Избыток «замороженных» в процессе электрокристаллизации железа вакансий, стекая в петли, служит источником дислокаций [20–22].

Плотность дислокаций в электролитическом железе может быть чрезвычайно высокой и достигать  $10^{12}\text{--}10^{13}$  см<sup>-2</sup> [1–3 и др.]. Вместе с тем существует верхний предел возможной плотности дислокаций, ограниченный допустимым расстоянием между ними:  $L = 2r$ , где  $r = (2\text{--}3)b$  – радиус ядра дислокации;  $b$  – кратчайшее расстояние в решетке. Когда останутся одни ядра, решетки не будет – в веществе выделить отдельные дислокации невозможно [20]. Следовательно, дислокации существуют лишь при их плотности  $\rho \leq 10^{13}\text{--}10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Дилатация  $\delta_d$ , обусловленная дислокациями, в соответствии с оценками  $\delta_d = 1,5\rho b^2$  [21] для электролитического железа при предельной плотности дислокаций порядка  $\rho_{пр} = (6b)^{-2} = 4,52 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> составит  $5,56 \cdot 10^{-2}$ . Несмотря на приближенность расчетов, эта величина достаточно хорошо совпадает с относительным изменением объема железа и большинства других «чистых» металлов при изменении термодинамической температуры от нуля до точки плавления  $\Delta V/V \approx 6 \cdot 10^{-2}$  [20]. Сравнение  $\delta_v$  и  $\delta_d$  позволяет выделить плотность дислокаций в

число основных параметров субмикроструктуры железа, ответственных за дилатацию (изменение плотности и объема).

Рентгеноструктурные исследования электролитического железа показали, что линейные дефекты сосредоточены внутри границ, разделяющих отдельные фрагменты, объем которых представляет собой участки металла с довольно совершенной структурой [1–3]. Ужесточение режимов электролиза (увеличение перенапряжения при выделении металла) приводит к уменьшению фрагментов и увеличению угла разориентировки между ними. Следует заметить, что размеры областей когерентного рассеяния рентгеновских лучей (блоки мозаики –  $D$ ), принимаемые во многих работах за основную характеристику тонкой структуры электролитических покрытий, прямо связаны с плотностью дислокаций, сосредоточенных в субзеренных границах зависимостью Смолмена [23]:

$$\rho = 3 D^{-2}. \quad (2)$$

Для вывода зависимостей, связывающих плотность дислокаций и размер блоков мозаики с дилатацией электролитического железа, воспользуемся имеющимся в литературе соотношением для определения плотности дислокаций, сосредоточенных в границах субзерен [21, 22]. Принимая  $\theta = \varepsilon = \delta/3$ , получаем:

$$\rho = 2/3 K \delta (D b)^{-1}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от формы зерен.

Заменив в уравнении (3)  $\rho$  величиной блоков по формуле (2), получим соотношение, непосредственно связывающее дилатацию и размер блоков мозаики:

$$D = K_3^{-1} b \delta^{-1}, \quad (4)$$

где  $K_3^{-1} = 2/9 K$ , а для связи плотности дислокаций с дилатацией из уравнений (3) и (4) можно записать выражение

$$\rho = 3 K_3^2 b^{-2} \delta^2. \quad (5)$$

Для предварительной оценки значения коэффициента  $K_3$  воспользуемся уравнением Хирша, широко применяемым для экспериментального анализа дислокационной структуры электролитического железа [23]:

$$\rho = \beta (3 D b)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\beta$  – угол разориентировки, определяемый экспериментально.

Принимая во внимание, что относительное удлинение образца  $\varepsilon = \beta$  [20], произведя соответствующие замены в (6), получим:

$$\rho = \delta (9 D b)^{-1}. \quad (7)$$

Сопоставление (3) и (7) позволяет предварительно установить значение  $K = 1/6$  и краевые условия:

$$\text{при } \delta \rightarrow 0, D \rightarrow \infty, \rho \rightarrow 0; \quad (8)$$

$$\text{при } \delta \rightarrow \infty, D \rightarrow 0, \rho \rightarrow \infty. \quad (9)$$

Первое условие (8) кристаллографически соответствует идеальному материалу без дефектов (с идеальной кристаллической решеткой). Второе условие (9) не может быть выполнено, поскольку параметры субструктуры и дилатация металла ограничены предельными значениями  $D_{\min}$ ,  $\rho_{\max}$  и  $\delta_{\max}$ , отвечающими максимальной деформации, при которой металл теряет свою кристаллическую структуру (в первом приближении – это аморфный (жидкий) металл). Поэтому нижнее, краевое условие (9) уравнений (2)–(5) следует уточнить, приняв за предельное состояние металла точку его плавления. Попробуем это выполнить для железа, приняв минимальный размер блока равным постоянной кристаллической решетки. Если, по данным литературы [20, 21], принять изменение объема осадка  $\Delta V = 3\alpha T_{\text{пл}}$ , температуру плавления железа  $T_{\text{пл}} = 1806 \pm 5$  К, коэффициент теплового расширения  $\alpha = (1,02-1,43) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , плотность жидкого металла  $\gamma_{\text{ж}} = 7,0-7,13 \text{ г/см}^3$ , тогда  $D_{\min} = b = 2,48 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ ;  $K_3^{-1} = \delta_{\max} = (\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{ж}}) / \gamma_{\text{н}} = 0,064-0,113$ ,  $\rho_{\max} = (1,08-2,16) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Следует заметить, что значения плотности дислокаций  $\rho_{\max}$  с  $\rho_{\text{пр}}$  железа одинаковы по порядку. Зависимости плотности дислокаций ( $\rho \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) и размеров блоков ( $D$  в  $\text{Å}$ ) от дилатации примут вид (рис. 1):

$$D = (15,3-37,2) \delta^{-1}, \quad (10)$$

$$\rho = (2,1-12,7) \delta^2. \quad (11)$$

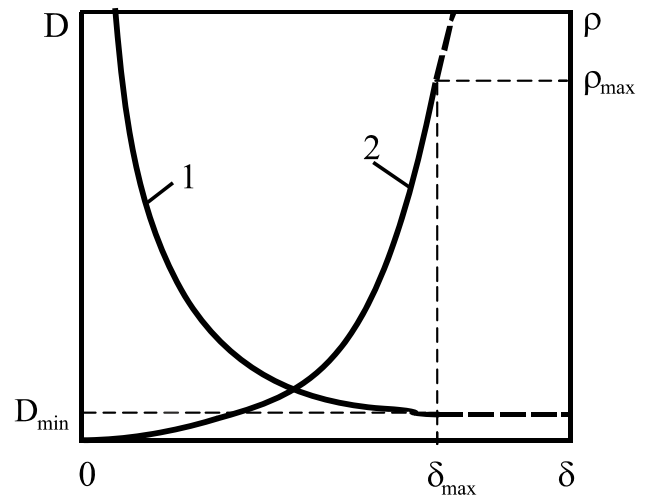


Рис. 1. Зависимость размеров блоков мозаики (1) и плотности дислокаций (2) электролитического железа от дилатации.



Рис. 2. Структура электролитического железа при «мягком» (а) и «жестком» (б) режимах электролиза.

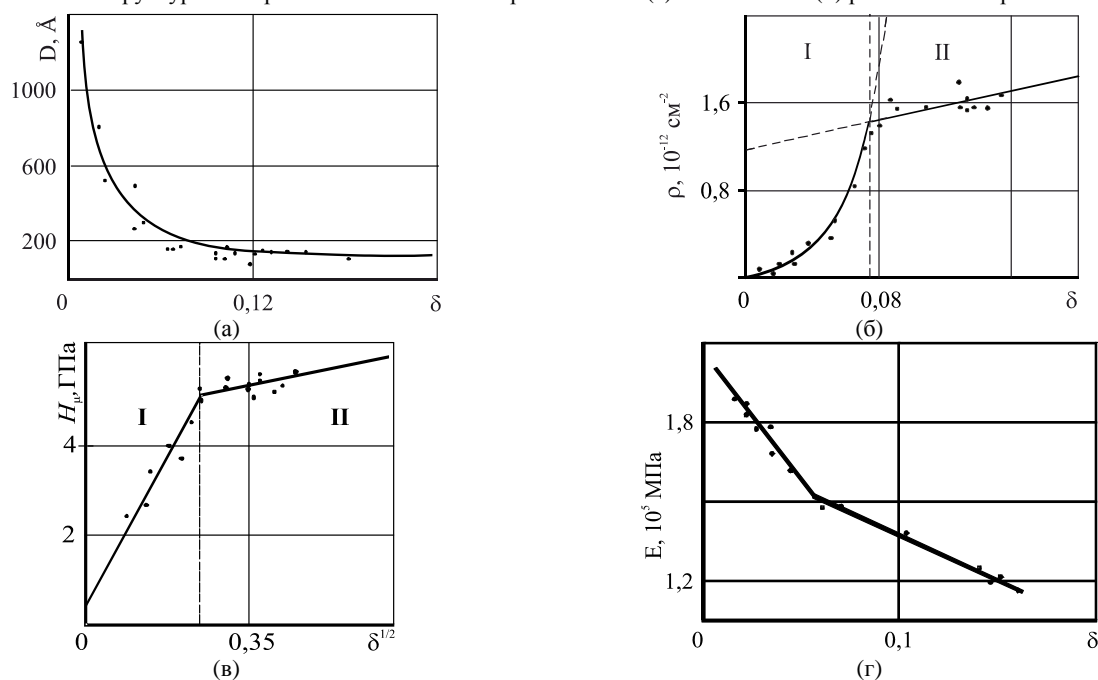


Рис. 3. Взаимосвязь между размером блоков мозаики и дилатацией (а), плотностью дислокаций и дилатацией (б), микротвердостью и дилатацией (в), модулем упругости и дилатацией (г). Область осадков: I – монолитных; II – трещиноватых.

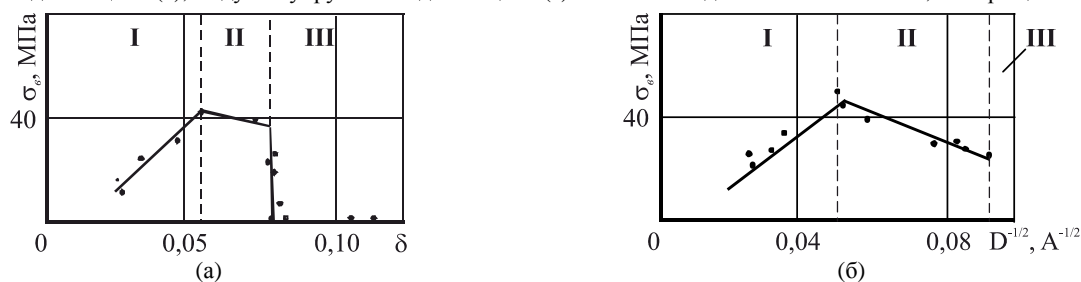


Рис. 4. Зависимость прочности на растяжение от дилатации (а) и размеров блоков мозаики (б) электролитического железа.

Зависимость (11) можно уточнить в области максимальных размеров блоков и минимальной плотности дислокаций, используя ограничения рентгеноструктурного метода.

Экспериментальные исследования по определению влияния условий электролиза на параметры субмикроструктуры осадков показали, что ужесточение режимов электролиза приводит к увеличению плотности дислокаций и измельчению блоков мозаики до предельных значений (при дилатации  $\delta = 0,06-0,07$ ) с последующим образованием в них устойчивых субмикротрещин (рис. 2).

Таким образом, наблюдалось упрочнение материала, обусловленное процессом пластической деформации осадка в процессе электролиза, аналогичное субмикроструктурному упрочнению при пластической деформации. Хотя при «жестких» режимах электролиза осадки были пронизаны густой сеткой субмикротрещин, их прочность на сдвиг и микротвердость повышались [1–3 и др.].

Анализ экспериментальных данных позволил установить зависимость  $D = f(\delta)$  при  $0,02 < \delta < 0,18$  (рис. 3а):

$$D = 17,45 \delta^{-1}. \quad (12)$$

Зависимость  $\rho = f(\delta)$  можно разделить на два участка (рис. 3б). На участке I (при  $0,02 \leq \delta \leq 0,055-0,065$ ) функция имела вид

$$\rho = 18,6\delta^2. \quad (13)$$

На участке II (при  $0,065-0,07 \leq \delta \leq 0,18$ ) зависимость  $\rho = f(\delta)$  претерпевала излом и изменяла характер. При обработке экспериментальных данных была установлена линейная зависимость  $\rho = f(\delta)$ :

$$\rho = 1,16 + 3,52\delta. \quad (14)$$

Уравнения (12)–(14) позволяют связать прочностные параметры материалов с дилатацией последних при изменении их субмикроструктуры в различных условиях электролиза. Вместе с тем, рассматривая механизмы пластической деформации реальных металлов, следует учитывать, что параметры субмикроструктуры могут характеризовать свойства до предельного упрочнения, соответствующего  $\delta = 0,06-0,07$ , после которого в структуре материала появляется новый вид дефектов – субмикротрещины (см. рис. 2). Экспериментальная зависимость  $H_m = f(\delta^{1/2})$  также имела линейный характер с изломом в области  $\delta = 0,06-0,07$  ( $D = 250-350$  А). Участок кривой до перегиба характеризуется процессом пластической деформации при электролизе, измельчением блоков мозаики, ростом плотности дислокаций, за счет чего происходит упрочнение осадков до предельного состояния. В области трещиноватых осадков (за перегибом кривой) влияние трещин приводит к перегибу функции  $H_m = f(\delta^{1/2})$ . Поскольку трещины препятствуют движению дислокаций, тем самым они упрочняют материал, однако закономерность их действия отличается от субструктурного упрочнения монолитных осадков.

До появления в структуре железа устойчивых микротрещин зависимость микротвердости ( $H_\mu$ , ГПа) электролитического железа от дилатации имела вид (рис. 3в):

$$H_\mu = 0,15 + 20,48 \delta^{1/2}, \quad \text{если } 0,02 \leq \delta \leq 0,055-0,065, \quad (15)$$

а в области трещиноватых осадков:

$$H_\mu = 5,22 + 0,16 \delta^{1/2}, \quad \text{если } 0,065-0,07 \leq \delta \leq 0,18. \quad (16)$$

Для бездефектных материалов модуль упругости будет одинаков как для микроскопически малого объема, так и для образцов любых размеров. Реальные материалы обладают различными дефектами, присутствие которых будет сказываться на величине модуля упругости. Действительно, сопоставление найденных величин модуля упругости и дилатации осадков и анализ полученных закономерностей позволили устано-

вить линейность зависимости модуля упругости от дилатации, характеризующей структуру материала не только в области пористых осадков, но и до их растрескивания. Причем область перегиба по дилатации достаточно точно совпадала с соответствующей областью на кривых зависимости параметров субмикроструктуры от дилатации. Можно предположить, что субмикротрещины в покрытиях появляются после предельно возможной деформации, которую можно компенсировать дроблением кристаллов на блоки и увеличением плотности дислокаций.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить уравнение линейной регрессии функции  $E = f(\delta)$  до перегиба в следующем виде (рис. 3г):

$$E = 2,17 - 10,13\delta. \quad (17)$$

В области трещиноватых осадков зависимость описывается уравнением

$$E = 1,70 - 3,29\delta. \quad (18)$$

Таким образом, зависимости (17) и (18) позволяют определить модуль упругости железных покрытий по дилатации осадков.

Низкая прочность осадков электролитического железа объясняется особенностями формирования покрытия на катоде, исходной структурой и дефектами кристаллического строения. Действительно, если построить зависимость прочности при растяжении электролитического железа  $\sigma_b$  от дилатации и размеров блоков мозаики, можно установить, что эти величины весьма тесно взаимосвязаны друг с другом (рис. 4а и б).

Причем зависимости  $\sigma_b = f(\delta)$  и  $\sigma_b = f(D^{-1/2})$  обнаруживают три характерные области. Область I – возрастания  $\sigma_b$ , связанную с увеличением дилатации, обусловленную измельчением блоков мозаики и увеличением плотности дислокаций вплоть до перехода структуры в «предельно» деформированное состояние, до появления субмикротрещин. В данной области формируются плотные монолитные осадки, обладающие наибольшей прочностью и износостойкостью. Для получения таких осадков рекомендуются мягкие режимы электролиза:  $D_k = 5-10$  А/дм<sup>2</sup>;  $T = 333-363$  К; рН = 0,1–0,5. Область II – линейного падения  $\sigma_b$ , связанную с увеличением дилатации, обусловленную образованием и увеличением плотности новых дефектов (субмикротрещин), развивающихся в осадке при ужесточении условий электролиза. Область III – область практически вертикального падения прочности до разрушения осадков (при увеличении размеров субмикротрещин, пронизывающих осадок полностью). При достижении дилатации 0,07–0,08 покрытие перестает сопротивляться растягивающим нагрузкам. При этом область соответствующим

ет переходу структуры металла в «предельно» деформированное состояние с появлением субмикротрещин и падению его прочностных свойств. В данной области формируются разрушенные осадки. Вместе с тем такие осадки можно использовать для получения покрытий со специальными свойствами, например с повышенной маслостойкостью за счет создания сетки трещин.

### ВЫВОДЫ

Выявленная зависимость прочности «чистых» электролитических покрытий от дилатации показала, что область их упрочнения за счет субструктурных изменений ограничена.

Анализ связи дилатации металла с фрагментацией его блочной структуры, физико-механическими свойствами и разрушением показал, что дилатация, являясь простым и доступным методом исследования электроосажденных металлов, позволяет достаточно корректно судить об их структуре и качестве. Зависимости (12)–(18) могут быть использованы для экспресс-оценки свойств электроосажденных металлов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Электролитическое осаждение железа*. Под ред. Г.Н. Зайдмана. Кишинев: Штиинца, 1990. 193 с.
2. Гурьянов Г.В. *Образование дефектов структуры в электролитическом железе*. Кишинев: Штиинца, 1989. 43 с.
3. Гурьянов Г.В. *Структура и механические свойства электролитических железных покрытий*. Кишинев: Штиинца, 1989. 61 с.
4. Ройтбурд А.Л. Особенности развития фазовых превращений в кристаллах. *Проблемы современной кристаллофизики*. Сб. трудов. М.: Наука, 1975. С. 345.
5. Кристиан Дж. *Теория превращений в металлах и сплавах*. М.: Мир, 1978. 806 с.
6. Сафронов Р.И. Электроосаждение железо-боридных покрытий и их термическая обработка. *Автореф. дисс. к.т.н.* Курск, 2007.
7. Азовский В. М. Электроосаждение и структура электролитических слоев цинка и сплава цинк-железо. *Автореф. дисс. к.т.н.* Тольятти, 1984.
8. Серебровский В.В. Разработка комбинированных методов восстановления и упрочнения изношенных деталей сельскохозяйственной техники на основе железнения. *Автореф. дисс. к.т.н.* Москва, 2007.
9. Скнар И.В., Баскевич А.С., Данилов Ф.И. Структура никелевых гальванопокрытий, осажденных метансульфоновых электролитов, и их физико-механические свойства. *Вестник ХНУ*. 2009, (17), 292–295.
10. Фирстов С.А., Роголь Т.Г., Шут О.А. Упрочнение поликристаллов при переходе от микро- к нано-структурированному состоянию. *Физико-химическая механика материалов*. 2009, (6), 5–12.
11. Савченков Э.А., Айткулов Р.Р. Оптимизация субструктуры и свойств стали комплексной ударно-волновой и термической обработкой. *Сборник тезисов V Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов»*, Черноголовка, 2008. С. 41–42.
12. Гурьянов Г.В. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники износостойкими покрытиями из электролитов суспензий. *Автореф. дисс. д.т.н.* Кишинев, 1992. 34 с.
13. Кисель Ю.Е. Повышение долговечности быстрознашиваемых деталей сельскохозяйственной техники композиционными электрохимическими покрытиями. *Автореф. дисс. к.т.н.* Москва, 2002. 21 с.
14. Юдина Е.М. Повышение ресурса восстановленных деталей сельскохозяйственной техники композиционными гальваническими покрытиями на основе железа. *Автореф. дисс. к.т.н.* Кишинев, 1993. 18 с.
15. Ташкин А.Е. Исследование влияния условий электролиза на некоторые основные механические характеристики электролитических железных покрытий. *Автореф. дисс. канд. техн. наук.* Каунас, 1970. 19 с.
16. Миркин А.Н. *Справочник по рентгено-структурному анализу поликристаллов*. М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1962. 867 с.
17. Кузьменко В.А. *Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов*. Киев: Изд-во АН УССР, 1963. 153 с.
18. Ахматов А.С. и др. *Лабораторный практикум по физике*. М.: Высш. школа, 1980. 360 с.
19. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. *Теория вероятностей и математическая статистика*. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.
20. Амеликс С. *Методы прямого наблюдения дислокаций*. М.: Мир, 1968. 440 с.
21. Новиков И.Н. *Дефекты кристаллического строения металлов*. М.: Металлургия, 1975. 208 с.
22. Дамаск А., Динс Дж. *Точечные дефекты в металлах*. М.: Мир, 1966. 282 с.
23. Хирш П.В. *Успехи физики металлов*. Вып. 3. М.: Металлургиздат, 1960. 283 с.

Поступила 02.11.12

После доработки 28.06.13

### Summary

Dilation is used to establish the dependence of durability of metal coatings on parameters of microstructure of metals at electrodeposition and thermal treatment. The influence of high temperature on resistance and composition of coatings is analyzed. It is shown that dilatation can be used as a control parameter of strength properties of iron.

*Keywords: composite electrochemical coatings, electrolytical alloys, structure, mechanical properties, wear-resistance, dispersed phase.*