———— ОБЗОР ——

УДК 539.5+542.87+621.9

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОСКЛЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭФФЕКТА РЕБИНДЕРА. ОБЗОР<sup>1</sup>

© 2020 г. Е. Д. Щукин<sup>1</sup>, В. И. Савенко<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский просп., 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия \*e-mail: visavenko@rambler.ru Поступила в редакцию 26.06.2020 г.

После доработки 30.06.2020 г. Принята к публикации 02.07.2020 г.

Дан краткий обзор работ, посвященных исследованиям влияния активной внешней среды на повреждаемость поверхности твердых тел и материалов при контактных воздействиях (эффект Ребиндера). Приведено описание принципиально новой методики, в которой процесс микроцарапания совмещен с электрохимическим восстановлением активного компонента на исследуемой поверхности материала. Данная методика позволяет моделировать и изучать явление жидкометаллического охрупчивания материала в отсутствие на его поверхности фазы жидкого металла.

DOI: 10.31857/S0023291220060142

## введение

В большинстве случаев разрушение твердого тела начинается на его поверхности. Трение контактирующих и взаимно перемещающихся деталей машин и механизмов, а также их износ – сугубо поверхностные явления. Этим обстоятельством определяется необходимость использования для изучения их микромеханизмов прецизионных методов анализа, позволяющих наблюдать начальные стадии повреждения поверхности твердых тел и материалов, и, в особенности, те из них, которые связаны с проявлением влияния активной среды на механические свойства исследуемых объектов [1–3]. Микроиндентирование традиционно служит основным методом при изучении механических свойств приповерхностных слоев конструкционных материалов и изделий. Указанный метод достаточно подробно разработан как теоретически, так и экспериментально; он обеспечен набором новейших приборов, вплоть до наноскопического уровня [4-8], где этот метод смыкается с современными методами сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии [9, 10].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Методом микроиндентирования была получена важная экспериментальная информация, относящаяся к изучению чувствительности механических свойств твердых тел и материалов к влиянию внешней среды. Таковы, в частности, исследования создаваемых индентором дислокационных розеток, выявляемых после избирательного травления поверхности образца (рис. 1): измерения пробегов краевых ( $l_e$ ) и винтовых дислокаций ( $l_s$ ) с учетом различий в их энергетике, оценка их стартовых напряжений и т.д. [11–13].

В качестве примера можно упомянуть данные работы [13], полученные в опытах по микроиндентированию поверхности (001) монокристаллов NaCl при различных граничных условиях. Отношения пробегов краевых и винтовых дислокаций  $\theta = l_e/l_s$  сравнивались для розеток, полученных при испытаниях в инертной среде (тщательно осушенный гептан) и в условиях влажной воздушной атмосферы. Величина эффекта определялась параметром  $R = (\theta - \theta_0)/\theta_0$ , где  $\theta_0$  – постоянное значение  $\theta$  при больших нагрузках P, при которых  $R \approx 0$  (см. табл. 1).

В обоих случаях подвижность винтовых дислокаций, порождающих при своем движении новые ячейки поверхности, оказывается меньше, чем краевых дислокаций. Снижение поверхностной энергии образцов NaCl при адсорбции воды облегчает перемещение винтовых дислокаций в кристаллической решетке. Эти эффекты тем более значительны, чем меньше нагрузка на индентор и тоньше приповерхностный слой образца, вовлеченный в пластическую микродеформацию.

Однако инструментальные возможности метода микроиндентирования ограничены рядом

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> По материалам доклада Е.Д. Щукина на 16th Conference of the Association of Colloid and Interface Scientists – IACIS2018.



**Рис. 1.** Общий вид и геометрические характеристики дислокационных розеток укола, создаваемых в монокристаллической поверхности NaCl в гептане [13]. Нагрузка на индентор P = 0.03 Н. Пояснения обозначений в тексте.

обстоятельств. Применительно к изучению влияния среды на механические свойства материалов эти ограничения обусловлены: 1) наличием преимущественно сжимающих компонент тензора напряженного состояния в контактной зоне и 2) недоступностью поверхности образца для атомов (молекул, ионов) среды именно в зоне максимальных напряжений. (В упомянутых выше опытах с травлением дислокаций [12, 13] наблюдение за их поведением проводили на значительных расстояниях от места укола, см. рис. 1.)

Подобные ограничения преодолеваются, по крайней мере, частично в экспериментах, включающих тангенциальное движение индентора вдоль поверхности образца, т.е. при склерометрических (царапающих) испытаниях материала. Такие испытания особенно информативны при малых нагрузках на индентор, как это имеет место в разработанной ранее методике ультрамикросклерометрии [14]. При очень малых нагрузках на индентор эта методика позволяет наблюдать появление самых первых индивидуальных дислокаций вдоль трассы индентора, т.е. фиксировать элементарные акты пластического повреждения приповерхностного слоя материала. Линейная плотность дислокаций вдоль трассы возрастает с постепенным увеличением нормальной нагрузки Р на индентор, позволяя наблюдать переход от упругого поведения материала в контактной зоне к нанопластическому. Дальнейшее увеличение силы вдавливания Р ведет к появлению микропластической канавки, окруженной дислокационной зоной. заполненной полосами скольжения [15]. Наконец, при некоторой критической нагрузке Р<sub>с</sub> наблюдается появление первых микротрещин и переход к хрупкому поведению приповерхностного слоя материала [16]. Типичные примеры результатов микросклерометрических испытаний приведены на рис. 2. Склерометрические канавки на поверхности образца получены при нагрузках на индентор  $P_1 = 0.033$  H и  $P_2 =$ = 0.042 H.

Применение статистических методов обработки полученных результатов позволило количественно охарактеризовать переходы упругость → → нанопластичность → микропластичность → → микрохрупкость как для ионных кристаллов (NaCl, LiF), так и для металлических материалов (Mo), ковалентных кристаллов (GaAs), а также для аморфных твердых тел (кварц) в зависимости от pH окружающей образцы среды при их микросклерометрических испытаниях в соответствующих водных растворах солей и ПАВ, а также при варьировании других условий эксперимента [16–18].

Вместе с тем, следует отметить, что проведение стандартных микросклерометрических экспериментов сильно осложняется при изучении одного из наиболее важных проявлений эффекта Ребиндера — хрупкого разрушения твердых ме-

В гептане					На воздухе (относит. влажность 60%)			
<i>P</i> , 10 <sup>-2</sup> H	<i>l</i> <sub>e</sub> , мкм	$l_{\rm s}$ , мкм	θ	<i>R</i> , %	<i>l</i> <sub>e</sub> , мкм	<i>l</i> <sub>s</sub> , мкм	θ	R, %
0.32	48.2	17.0	2.82	39	46.2	19.7	2.36	13.3
0.54	63.8	24.2	2.64	30	64.5	29.4	2.19	7.9
1.54	117	49	2.38	17.2	112	54.5	2.05	≈0
3.27	172	74	2.33	14.8	176	88.3	1.99	≈0
10.4	297	146	2.03	≈0	300	146	2.05	≈0
19	496	249	1.99	≈0	503	250	2.01	≈0
40	607	298	2.04	≈0	603	298	2.02	≈0

Таблица 1. Характеристики дислокационных лучей в розетках, полученных при микроиндентировании и последующем избирательном травлении образцов NaCl в различных средах [13]





**Рис. 2.** Поверхность (100) монокристаллического образца LiF после микросклерометрических испытаний в гептане и последующего избирательного травления (а), а также схема строения зоны царапины (б); d – ширина канавки, 2L – ширина пластической зоны (заполненной линиями скольжения и дислокациями),  $2L_{\rm fr}$  – зона локализации хрупких трещин [16].

таллов и сплавов под действием поверхностноактивных металлических расплавов (жидкометаллическое охрупчивание, **ЖМО**). Причинами этого являются: усложнение опытов, проводимых при достаточно высоких температурах, проблема надежного смачивания поверхности образца расплавом, необходимость последующего удаления использованного жидкого металла для наблюдения полученных повреждений поверхности и т.д.

К излагаемому далее принципиально новому методу изучения механизма и закономерностей ЖМО экспериментаторы пришли в связи с использованием эффекта ЖМО для интенсификации механической обработки твердых металлов и сплавов. Такого рода возможности были показаны в случае сверления и резания закаленных сталей, титановых сплавов – в присутствии соответствующих металлических расплавов (эвтектики Zn–Sn, Cd и др.) [3, 19]. Радикальным шагом при этом стало применение эффекта ЖМО без участия жидкой фазы какого-либо активного металлического компонента. А именно, в этих экспериментах образец использовали как катод в соот-



**Рис. 3.** Схема прибора, использованного в работе [23]. Пояснения обозначений в тексте.

ветствующей электрохимической ячейке, и его механическая обработка велась в процессе восстановления минимального количества атомов поверхностно-активного металла на обрабатываемой поверхности [20–22]. Шлифование закаленной стали в таких условиях показало двукратное ускорение процесса. Такие же опыты были проведены и с алюминидом титана.

В ходе этих экспериментов впервые были использованы комбинация процессов микроцарапания (при микросклерометрических испытаниях) и электрохимического выделения минимального количества поверхностно-активного компонента в области, примыкающей к зоне контакта индентор/образец. Оказалось, что такая комбинированная методика может быть использована как весьма универсальная в различных исследованиях влияния среды на механические свойства твердых тел и материалов и, в частности, при их ЖМО. Первые опыты в этом инновационном направлении были проведены также с образцами закаленной углеродистой стали в процессе восстановления ионов водорода в 0.1 н. растворе NaOH (при pH 12.5) [20]. В условиях катодной поляризации, при протекании в электрохимической ячейке тока плотностью j = 5 мА см<sup>-2</sup> было обнаружено значительное охрупчивание материала в приповерхностном слое образца. В настоящее время этот метод успешно применяется для моделирования механического поведения типичных пар, обнаруживающих ЖМО.

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Образец 1 находится в электрохимической ячейке с раствором электролита 2. Вся поверхность образца покрыта лаковой пленкой 12 за исключением области 4, предназначенной для микросклерометрических испытаний. Разность потенциалов между образцом 1 и электродом 3



**Рис. 4.** СЭМ-изображение пластических канавок-микроцарапин, полученных на поверхности алюминиевого образца в отсутствие электрического тока (а) и при эффективной плотности тока j = 6.8 мА см<sup>-2</sup> (б). Нагрузка на индентор P = 0.1 H [23].

(анодом) поддерживается потенциостатом 11, работающим в потенциостатическом режиме. Используемые в этих экспериментах плотности тока всего лишь несколько мА см<sup>-2</sup>, очень малы по сравнению с обычными значениями плотности тока, которые применяются в известных методах электрохимической обработки металлов. Нагрузка прикладывается к индентору 5 (со стандартным наконечником в виде алмазной пирамиды Виккерса) в вертикальном направлении 6 и составляет от 0.005 до 1 Н (при царапании самых твердых материалов). В случае прецизионного микроцарапания она может быть снижена до 10<sup>-4</sup> H: для наблюдения зарождения первых дислокаций в высокопластичных кристаллах требуется использовать нагрузки порядка 10-6 Н. Перемещение индентора в горизонтальном направлении 7 с постоянной скоростью (1-10 мм/мин) задается асинхронным мотором 8 с редуктором 9. Специальный микроэлектрод 10 (типа капилляра Луггина) может быть помещен близко к острию индентора для наблюдения изменений электрохимических параметров в зоне повреждения поверхности [22].

Экспериментальные данные о наблюдении эффекта ЖМО для многих пар твердый/жидкий металл опубликованы рядом научных центров, включая Лабораторию физико-химической механики ИФХЭ РАН (см., например, [1–3, 19, 24–26]). В ряде случаев возможность эффекта ЖМО была предсказана на основе термохимических, или же квантово-механических оценок, но не всегда имела экспериментальное подтверждение. Имеющаяся информация зачастую недостаточно полна или даже противоречива. Описываемая далее методика открывает новый перспективный путь для нетрадиционного способа моделирования механического поведения таких пар. При этом эксперименты проводятся при комнатной температуре, при сопоставимых условиях присутствия подвижных атомов активных компонентов, при строго контролируемом количестве активного компонента и в отсутствие его жидкой фазы. (Как отмечалось выше, ее наличие требует не только высоких температур эксперимента, но и скрывает образующиеся при склерометрических испытаниях повреждения поверхности образцов.) Значительным преимуществом метода является возможность удаления окисной пленки с поверхности материала при катодной поляризации образца, обеспечивающая работу с совершенно чистой, "ювенильной" поверхностью. Следующие два эксперимента могут служить характерными примерами наблюдения ЖМО данным методом.

1. В литературе описан эффект значительного понижения прочности и охрупчивания образцов алюминия под влиянием жидкого галлия [23–26]. С помощью описанного выше устройства были проведены микросклерометрические испытания алюминия (99.999%) в 10%-ном (по массе) водном растворе сульфата галлия при нагрузке на индентор P = 0.1 Н и скорости перемещения индентора вдоль поверхности 10 мм/мин [23]. На рис. 4 приведены полученные в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) изображения двух пластических канавок-микроцарапин, образовавшихся на одном и том же образце в отсутствие электрического тока (а) и в условиях ка-

тодной поляризации при протекании в электрохимической ячейке тока эффективной (т.е. отнесенной к незащищенной лаковой пленкой поверхности образца) плотностью j = 6.8 мA см<sup>-2</sup> (б).

Во втором случае обнаруживается значительное, примерно на 20%, увеличение ширины канавки. Однако сколько-нибудь заметные трещины на поверхности образца при этом отсутствуют.

Несмотря на то, что стандартный электродный потенциал галлия Ga<sup>3+</sup>/Ga  $E_0 = -0.53$  B, водородное охрупчивание материала в данном случае также не имеет места. Такой результат можно рассматривать как доказательство существенного преобладания второй формы проявления эффекта Ребиндера над первой, т.е. пластифицирующего действия активной среды по отношению к ее охрупчивающему действию. Это происходит благодаря выбранному режиму относительно высокой исходной пластичности весьма чистого металла [3].

Одним из определяющих признаков эффекта Ребиндера является его обратимость: при удалении граничащей с образцом поверхностно-активной среды его механические свойства принимают исходное значение. На рис. 5 представлены результаты таких экспериментов с системой Al/Ga<sup>3+</sup>.

Показано, что ширина микроцарапины на алюминиевом образце обратимо изменяется при включении и выключении электрического тока. При выключении тока, т.е. в отсутствие протекания на поверхности образца процесса восстановления поверхностно-активных ионов Ga ширина канавки-микроцарапины принимает исходное значение.

2. Относительно новый и перспективный интерметаллид – алюминид титана – может служить примером чрезвычайно твердого и труднообрабатываемого материала. На рис. 6 приведены СЭМ-изображения двух соседних микроцарапин, созданных на поверхности одного и того же образца этого сплава в 10%-ном (по массе) водном растворе нитрата ртути в условиях катодной поляризации при эффективной плотности тока j = 2.6 (а) и 4.7 мА см<sup>-2</sup> (б) [27]. В обоих случаях нагрузка на индентор составляла P = 0.2 Н. В первом случае наблюдаются отдельные несвязные локальные области повреждения, распространяющиеся от центра канавки за ее пределы. Во втором случае обнаруживаются более сильные регулярные повреждения вдоль всей длины канавки, локализованные главным образом внутри нее.

По-видимому, здесь имеет место зависимость формы и величины эффекта от наличия определенного критического количества активного компонента, адсорбированного на поверхности образца в зоне разрушения. Аналогичные опыты



**Рис. 5.** Временная зависимость ширины микроцарапины при различных электрохимических условиях на поверхности образца. Стрелками показаны моменты включения и выключения тока плотностью j = 7.5 мA см<sup>-2</sup>. Нагрузка на индентор P = 0.1 H.

с электрохимическим восстановлением ионов кадмия на алюминиде титана также показывают значительное увеличение повреждаемости при микроцарапании.

Стоит отметить, что в этих экспериментах стандартный электродный потенциал пары  $Hg^{2+}/Hg$  равен  $E_0 = +0.854$  В, а для пары  $Cd^{2+}/Cd$ , также использовавшейся в ряде экспериментов, он равен  $E_0 = -0.403$  В. Однако сколько-нибудь заметного выделения водорода в обоих случаях не наблюдается. В последнем случае это, по-видимому, происходит из-за высокого значения перенапряжения, которое необходимо для выделения водорода на катоде из такого сплава как алюминид титана [28, 29].

Как отмечалось выше, пластифицирующее действие среды проявляется тем существеннее, чем меньше нормальная нагрузка на индентор P, т.е. в том случае, когда повреждение захватывает лишь достаточно тонкий приповерхностный слой анализируемого материала [1, 15–18]. Соответствующие данные, полученные в опытах с поликристаллическим образцом алюминия в растворе соли галлия приведены на рис. 7 в виде зависимостей ширины пластичной канавки-микроцарапины d от нагрузки на индентор P = 0.02-0.2 Н при различных электрохимических условиях испытаний.

Эти эксперименты показывают, что при любой фиксированной нагрузке на индентор *P* канавка-микроцарапина оказывается более широкой в случае (б), и относительная величина этого пластифицирующего эффекта тем больше, чем меньше нагрузка. В двойных логарифмических координатах, линеаризующих степенную зависи-



**Рис. 6.** СЭМ-изображение хрупких микроцарапин на поверхности образца алюминида титана, созданных в условиях его катодной поляризации, при эффективной плотности тока j = 2.6 мА см<sup>-2</sup> (а), и j = 4.7 мА см<sup>-2</sup> (б). Нагрузка на индентор P = 0.2 H [27].

мость  $d = \text{const } P^{1/n}$ , это проявляется в разном наклоне соответствующих прямых. Показатель *n* принимает значение  $n = 2.37 \pm 0.10$  в отсутствие электрического тока, тогда как в условиях электрохимического восстановления галлия на поверхности образца эта величина возрастает до  $n = 2.68 \pm 0.17$ .

Аналогичные эффекты, обусловленные пластифицированием приповерхностного слоя образцов при электрохимическом восстановлении поверхностно-активных ионов, наблюдаются при электрохимическом микроцарапании образцов золота в водных растворах нитрата ртути



**Рис.** 7. Зависимости ширины канавки *d* от нагрузки на индентор *P*, полученные при микроцарапании поликристаллического алюминия в растворе сульфата галлия в отсутствие тока (*a*) и при эффективной плотности тока j = 6.8 мА см<sup>-2</sup> ( $\delta$ ) [23].

(рис. 8) и образцов латуни в водных растворах сернокислого аммония (рис. 9).

Весьма многообещающим является воспроизведение в подобных условиях эффекта ЖМО с активными компонентами, обладающими более высокими температурами плавления. Очевидно, что с помощью данного метода можно выполнить



**Рис. 8.** Зависимости ширины канавки *d* от нагрузки на индентор *P*, полученные при микроцарапании поликристаллического золота в растворе, содержащем ионы ртути в отсутствие тока (*I*), и при эффективной плотности тока j = 4.1 мA см<sup>-2</sup> (2).

КОЛЛОИДНЫЙ ЖУРНАЛ том 82 № 6 2020

моделирование эффекта ЖМО для обширного набора пар твердый/жидкий металл, известных из экспериментальных исследований, или же предсказанных теоретически, - с изучением как геометрии канавки, характеристик пластических навалов, условий появления микротрещин, так и параметров возникаюшей дислокационной структуры. Вместе с тем, представляется практическая возможность выяснить роль различий в условиях реализации эффекта ЖМО в присутствии реальной фазы жидкого металла и в случае применения рассматриваемой здесь методики. Такие различия могут быть обусловлены, в частности, разными механизмами проникновения активных атомов в зону "предразрушения", локализованную вблизи вершины микротрещины. Кроме того, при проведении экспериментов в условиях катодной поляризации образца в водных растворах необходимо учитывать дополнительную конкуренцию между адсорбированными ионами металлов и ионами водорода за места на механоактивированной при царапании поверхности материала. Особое внимание при этом следует уделить анализу возможного, наряду с эффектом ЖМО, дополнительного влияния водородного охрупчивания материала в зоне "предразрушения".

Очевидно, что наряду с металлическими ионами, данный метод позволяет наблюдать влияние на поверхностную повреждаемость материала процессов, связанных с восстановлением также и неметаллических катионов, например, уже упомянутого водорода, в связи с изучением водородной хрупкости сталей (а также и с возможностью использования этого фактора для ускорения механической обработки особо твердой закаленной стали [20, 30]). Аммиак также представляет интерес как известный фактор растрескивания латуни.

В принципе, этот же метод позволяет применить *анодную* поляризацию, сопровождающуюся процессами окисления и адсорбции соответствующих активных анионов. В качестве экспериментальной среды наряду с водными растворами могут быть использованы и различные легкоплавкие соли, а также эвтектические смеси, применяемые, например, в виде тонкопленочных покрытий.

В рамках этих исследований актуальными задачами являются сближение данного метода электрохимической микросклерометрии с инструментальными методами наноскопического уровня, такими как атомно-силовая и туннельная микроскопия, дальнейшее усовершенствование микросклерометрии в направлении уменьшения нагрузок и анализ с помощью этих нанометодов влияния различных физико-химических факторов на поверхностную повреждаемость материалов.

КОЛЛОИДНЫЙ ЖУРНАЛ том 82 № 6 2020



**Рис. 9.** Зависимости ширины канавки *d* от нагрузки на индентор *P*, полученные при микроцарапании ла-

туни в растворе, содержащем ионы  $NH_4^+$  в отсутствие тока (*1*), и при эффективной плотности тока *j* = 3.5 (*2*), 5.6 (*3*), 10.4 мА см<sup>-2</sup> (*4*).

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На достаточно обширном экспериментальном материале продемонстрировано применение принципиально новой методики исследования электрохимического влияния поверхностно-активной среды на механические свойства приповерхностных слоев конструкционных материалов (эффекта Ребиндера). Показано, что данная методика может служить основой для создания экологически оптимизированных инновационных технологий обработки конструкционных материалов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за участие в обсуждении этих результатов профессору Ю.Д. Гамбургу и доктору A.R.C. Westwood.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физикохимическая механика металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
- 2. Environment-Sensitive Mechanical Behavior. Ed. by Westwood A.R.C., Stoloff N.S. N.Y.: Gordon and Breach, 1966.

- 3. *Rehbinder P.A., Shchukin E.D.* // Progress in Surface Science / Ed. by Davison S.G. Oxford: Pergamon Press, 1972. V. 3. № 2. P. 97.
- 4. Microhardness Technique in Materials Science and Engineering / Ed. by Blau P.J., Lawn B.R. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1986. V. 889.
- 5. Fisher-Cripps A.C. Nanoindentation. Berlin: Springer, 2011.
- Oliver W.C., Pharr G.M. // J. Mater. Res. 2004. V. 19. P. 3.
- Van Landingham M.R. // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2003. V. 108. P. 249.
- 8. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009.
- 9. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004.
- Парфенов В.А., Юдин И.А. // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2015. № 9. С. 61.
- Shchukin E.D., Kochanova L.A., Savenko V.I. // Advances in Mechanics and Physics of Surfaces / Ed. by Latanision R.M., Courtel R.L. N.Y.: Harwood Acad. Publ., 1981. P. 111.
- 12. Савенко В.И., Щукин Е.Д. // Коллоид. журн. 2007. Т. 69. С. 834.
- Савенко В.И., Щукин Е.Д. // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. С. 2121.
- 14. Savenko V.I., Kochanova L.A., Shchukin E.D. // Wear. 1979. V. 56. P. 297.
- Shchukin E.D., Savenko V.I., Kochanova L.A. // Physical Chemistry of Solid State. Applications to Metals and Their Compounds / Ed. by Lacombe P. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 47.
- 16. Kochanova L.A., Kuchumova V.M., Savenko V.I., Shchukin E.D. // J. Mater. Sci. 1992. V. 27. P. 5516.

- Шукин Е.Д., Кочанова Л.А., Савенко В.И. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1982. № 2. С. 25.
- Shchukin E.D., Kochanova L.A., Savenko V.I. // Modern Aspects of Electrochemistry / Ed. by White, R.E., Convey B.E., Bockris, J.O'M. N.Y.: Plenum Press, 1993. P. 245.
- 19. Shchukin E.D., Polukarova Z.M., Savenko V.I. The Studies of Liquid Metal Embrittlement in Solids (LME-effect). Saarbrucken, Riga: Lambert Academic Publ., 2018.
- Виденский И.В., Петрова И.В., Шукин Е.Д. // Коллоид. журн. 1992. Т. 54. С. 19.
- Vidensky I.V., Petrova I.V., Shchukin E.D. // J. Mater. Res. 1993. V. 8. P. 2224.
- 22. Shchukin E.D., Vidensky I.V., Petrova I.V. // J. Mater. Sci. 1995. V. 30. P. 3111.
- Shchukin E.D., Vidensky I.V., Savenko V.I. // Colloids Surf. A. 1998. V. 142. P. 175.
- 24. Rostoker W., McCaughey J.M., Markus H. Embrittlement by Liquid Metals. N.Y.: Rheinhold, 1960.
- 25. Embrittlement by Liquid and Solid Metals / Ed. by Kamdar M.H. Warrendale, PA: Metallurgical Society of AIME, 1984.
- Полукарова З.М., Брюханова Л.С., Ющенко В.С., Щукин Е.Д. // ФХММ. 1986. Т. 22. № 5. С. 39.
- Vidensky I.V., Shchukin E.D., Savenko V.I., Petrova I.V., Polukarova Z.M. // Colloids Surf. A. 1999. V. 156. P. 349.
- Гамбург Ю.Д., Зангари Дж. Теория и практика электроосаждения металлов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015.
- 29. *Андреев Ю.Я.* Электрохимия металлов и сплавов. М.: ИД "Высшее образование и наука", 2016.
- Nielsen K.C., Kirschbaum R., Latanision R.M. // Modern Machine Shop Magazine. 1974. V. 46. № 9. P. 69.