

Н. А. Амирханова\*, Р. З. Валиев\*\*, И. В. Александров\*\*, А. Г. Балянов\*, Ю. Б. Кутнякова\*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ МЕДИ М1 НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКУЮ ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ В СРАВНЕНИИ С КРУПНОЗЕРНИСТЫМ АНАЛОГОМ

\* УГАТУ, кафедра общей химии, ул. К. Маркса 12, г. Уфа, Россия, Башкортостан,

\*\* УГАТУ, Институт физики перспективных материалов,  
ул. К. Маркса 12, г. Уфа, Россия, Башкортостан

#### Введение

Медь и сплавы на ее основе обладают рядом ценных механических, электрических и коррозионных свойств. Важное качество меди – высокая пластичность в горячем и холодном состояниях, что позволяет изготавливать из меди сильнодеформированные изделия.

В последние годы развитие методов обработки металлов давлением, позволяющих осуществлять большие пластические деформации, привело к разработке различных методов получения ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов с нанокристаллической и субмикроструктурной структурой [1]. В настоящее время накопилось множество экспериментальных данных, связанных главным образом с изучением термической стабильности [2], микротвердости [3], структурных характеристик [2, 4] и механических свойств [5]. В то же время повышенный интерес представляют коррозионные и электрохимические свойства, в частности, электрохимическая обработка (ЭХО) УМЗ материалов. УМЗ структура очень чувствительна к повышению температуры, поэтому перспективным для получения деталей из УМЗ материалов является ЭХО, при которой не происходит большого нагрева поверхностного слоя, как, например, при резании, фрезеровании и т.д.

#### Теоретический анализ

Электрохимические свойства металлов и сплавов, подвергнутых пластической деформации, были предметом многочисленных исследований, в результате которых получены весьма противоречивые сведения относительно влияния деформационных воздействий.

Для выяснения причин влияния пластической деформации, Х. Бюхлер и В. Швенк провели исследования по определению влияния деформации на скорость протекания анодных и катодных реакций на электроде. Была установлена прямая связь между увеличением скорости анодной реакции растворения металла и возрастанием плотности дислокаций в нем при пластической деформации [6]. Н.В. Румак [7] исследовал электрохимическое растворение меди в 1% растворе соляной кислоты, содержащем 0,5% пероксида водорода (имитация морской воды), в зависимости от степени деформации, режимов и условий контактного трения при прокате. Показано, что наибольшей коррозионной стойкостью обладает непосредственно контактирующий с деформирующим инструментом поверхностный слой образцов; коррозионная стойкость образцов, прокатанных по дробному режиму деформирования, ниже, чем образцов, прокатанных за один проход. По данным Т.П. Хора [8] растворение металла происходит преимущественно на активных участках поверхности с меньшей энергией активации растворения металла. Пластическая деформация увеличивает плотность активных участков на поверхности металла и приводит, таким образом, к возрастанию скорости его растворения. В работе [9] было экспериментально установлено, что растворение металла происходит преимущественно ступенчато, соответственно в местах выхода дислокаций на поверхность, по границам зерен и блоков

мозаики. Связь скорости растворения железа с плотностью дислокаций была показана З. Фороулисом и Г. Улигом в работе [10], которые установили, что скорость растворения холоднокатаного железа возрастает лишь в случае содержания в нем примесей. Е. Биллинг [11], основываясь на представлениях А. Коттрелла [12] о собирающихся в виде «атмосферы» вокруг дислокаций атомах примеси, приходит к выводу, что селективное растворение пластически деформированного циркония обусловлено не непосредственно влиянием дислокаций, а преимущественной сегрегацией примесей на них. Существует целый ряд предложений относительно причины повышенной реакционной способности металлов в местах нарушений его кристаллической решетки. Г.В. Акимов [13] предполагает, что у деформированного металла более низкая работа выхода иона, так как в этом случае ион металла может легче покинуть кристаллическую решетку по сравнению с недеформированным металлом. Т.П. Хор считает, что атомы металла, находящиеся в кристаллических ступенях, образованных вышедшими на поверхность дислокациями, с одной стороны, менее прочно связаны с решеткой, а с другой, более тесно окружены молекулами растворителя и находятся в полусольватированном состоянии. Свободная энергия активации растворения таких атомов гораздо ниже, чем атомов, входящих в состав плотноупакованной грани [8]. С.Н. Губкин [14] объясняет повышенную склонность деформированного металла к растворению накоплением в нем связанной потенциальной энергии, проявляющейся в виде остаточных напряжений. Относительно причины влияния остаточных напряжений на коррозионное поведение металла существуют две точки зрения: снижается термодинамическая устойчивость металлов и нарушаются защитные свойства оксидных пленок вследствие их растрескивания и изменяются условия роста на напряженной решетке металла. Считается, что на поверхности отожженного металла оксидные пленки образуются в основном по границам зерен, а на деформированном – по всей поверхности [15]. Дефекты дают возможность проникать активирующим ионам к металлу. На дефектных местах прекращается рост оксидной пленки, создается повышенная напряженность поля, происходит активация анода.

Имеющиеся экспериментальные данные в основном относятся к изучению коррозионной стойкости УМЗ материалов, являются немногочисленными и во многом противоречивыми. В работе [16] установлено, что коррозионное поведение УМЗ меди количественно не изменяется по сравнению с поликристаллической медью. Р. Рофага с соавторами [17] показали, что для чистого никеля в нанокристаллическом состоянии коррозионное сопротивление сохраняется неизменным в сравнении с поликристаллическим аналогом. В то же время указанный выше автор исследуя нанокристаллический сплав Ni-P, установил значительное уменьшение коррозионной стойкости этого сплава по сравнению с поликристаллическим аналогом [18]. А.Т. Ауст в работе [19] выявил, что УМЗ материалы могут обладать повышенной коррозионной стойкостью по сравнению с их кристаллическими аналогами. Поведению УМЗ материалов в условиях ЭХО посвящена единственная работа [20], в которой исследовалась электрохимическая обрабатываемость алюминиевого сплава 1421 с УМЗ структурой в сравнении с крупнозернистым аналогом. Найдено, что УМЗ структура растворяется как в хлоридах, так и нитратах, что обусловлено меньшей локализацией внутриверного растворения и вследствие этого более однородным растворением УМЗ структуры.

#### **Методика эксперимента.**

Ультрамелкозернистая структура технически чистой меди М1 с размером зерен около 0,3 мкм была получена с помощью метода равноканального углового прессования [1, 2]. В крупнозернистой меди размер зерен составлял 10–15 мкм.

Для проведения поляризационных измерений применялась установка с вращающимся дисковым электродом. Электрохимическая ячейка с установочными окнами для электрода сравнения и капилляра закреплялась на крестовом столе с микрометрическими винтами, обеспечивающими взаимно-перпендикулярные перемещения ячейки в горизонтальном и вертикальном направлениях, что позволяло осуществить подвод и точную установку капилляра на фиксируемом расстоянии от поверхности исследуемого электрода. Расстояние между капилляром Луггина-Габера и исследуемым электродом контролировалось с помощью микроскопа МБР-1. Поляризация электродов осуществлялась с помощью потенциостата ПИ-50-1.1 с разверткой потенциала 3 В/мин. Все потенциалы приведены относительно насыщенного хлорсеребряного электрода. Рабочие электроды из исследуемой меди марки М1 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурами для потенциодинамических поляризационных измерений изготавливались в виде цилиндров диаметром 3 мм, боковые грани которых изолировались тефлоном. Рабочей поверхностью служил только торец образца. Перед каждым опытом поверхности электродов зачищались наждачной бумагой до шестого класса шероховатости и химически полировались в течение 3 минут в электролите состава: 50 мл

азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ), 25 мл ледяной уксусной кислоты ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), 25 мл фосфорной кислоты ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), затем подавался потенциал в соответствии с задаваемой программатором ПР-8 разверткой и диапазоном поляризации.

Исследования проводились также в условиях, имитирующих реальный процесс ЭХО. Определяли скорость съема и выход по току в зависимости от напряжения и величины межэлектродного зазора. Применялась специальная установка, представляющая собой ячейку из органического стекла. Между цилиндрическим катодом и анодом с диаметром торца 6 мм с помощью индикатора часового типа устанавливали требуемый зазор (с точностью до 0,01 мм), через который прокачивался электролит методом вытеснения сжатым воздухом. С целью ограничения объемов электролита и количества операций по его заливу и сливу, а также создания наибольшей герметичности в установке с помощью трехпозиционного распределительного крана обеспечивается круговая циркуляция электролита. Изменением давления в системе создавались необходимые скорости прокачки электролита через межэлектродный зазор. Поляризация осуществлялась с помощью источника импульсного тока (длительность импульса – 10 мс, скважность – 2), процесс проходил при постоянном напряжении 6 В, регистрировали изменение тока, фиксировали время обработки каждого образца. Перед ЭХО и после нее образцы взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Перед каждым опытом поверхность электродов защищалась наждачной бумагой с убывающей степенью зернистости, промывалась спиртом.

Высота микронеровностей обработанной поверхности образцов измерялась на приборе «Профилметр 170622». Изучение микроструктуры поверхности образцов осуществлялось с помощью микроскопа ZEISS Axiotech 25HD.

### Обсуждение результатов

#### *Поляризационные потенциодинамические исследования меди с УМЗ и крупнозернистой структурой*

Общую картину анодного растворения можно получить регистрацией поляризационных потенциодинамических кривых. Для установления влияния природы и концентрации электролита на скорость растворения крупнозернистой и УМЗ меди снимались поляризационные потенциодинамические кривые в растворах хлорида и нитрата натрия.

На рис. 1,а,б представлены поляризационные потенциодинамические кривые для меди с УМЗ и крупнозернистой структурой в хлориде натрия.

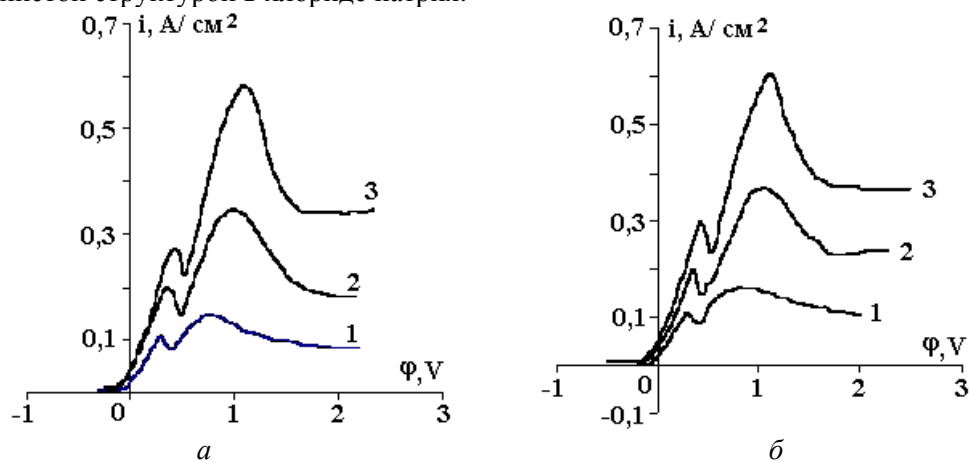


Рис. 1. Поляризационные потенциодинамические кривые для меди: а – с крупнозернистой структурой; б – с УМЗ структурой в растворах хлорида натрия, %: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15.

Как видно из рис. 1, растворение начинается в активной области при потенциале  $-0,2$  В и характеризуется независимо от концентрации двумя максимумами: первый максимум – при потенциале  $0,3-0,4$  В, второй – при потенциале  $1,1-1,5$  В. Наличие двух максимумов свидетельствует о том, что при потенциале до  $0,4$  В происходит ионизация меди в низковалентной форме, а при втором максимуме – в высоковалентной форме. При потенциале  $1,2$  В происходит торможение процесса, что обусловлено, как отмечается в работах [21, 22], образованием на поверхности меди трудно-растворимой соли  $\text{CuCl}$ .

С повышением концентрации хлорида натрия как для крупнозернистой структуры, так и для УМЗ структуры меди М1, максимумы начинают сдвигаться в область положительных значений, как

показано на рис. 1,а,б. На рис. 2 для сравнения приведены поляризационные кривые для меди с УМЗ и крупнозернистой структурой. Из рисунка, следует, что ход поляризационных кривых практически совпадает, но для УМЗ структуры максимумы характеризуются несколько более высокими плотностями тока.

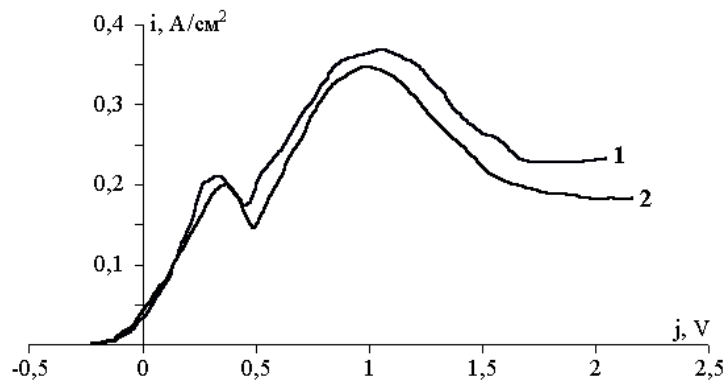


Рис. 2. Поляризационные потенциодинамические кривые в 10% NaCl: 1–медь с УМЗ структурой; 2–медь с крупнозернистой структурой.

На рис. 3 приведены поляризационные потенциодинамические кривые для меди с УМЗ и крупнозернистой структурой в нитрате натрия различной концентрации.

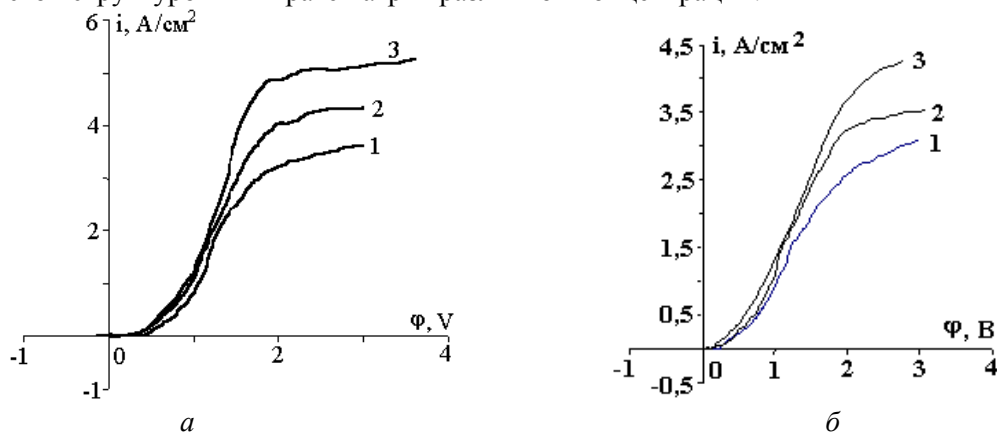


Рис. 3. Поляризационные потенциодинамические кривые для меди: с крупнозернистой структурой (а), с УМЗ структурой в нитрате натрия разной концентрации (б), %: 1–5; 2 –10; 3–15.

В отличие от растворов хлорида натрия растворение меди начинается в анодно-анионной области с потенциала равного 0,4 В и характеризуется постепенным увеличением плотностей тока при сдвиге потенциалов в область более положительных значений. С ростом концентрации нитрата натрия возрастают значения предельного тока. Аналогичные кривые получены для меди с УМЗ структурой. При сопоставлении хода поляризационных кривых для меди с УМЗ и крупнозернистой структурой (рис. 4) выяснено, что медь с УМЗ структурой растворяется при более низких плотностях тока.

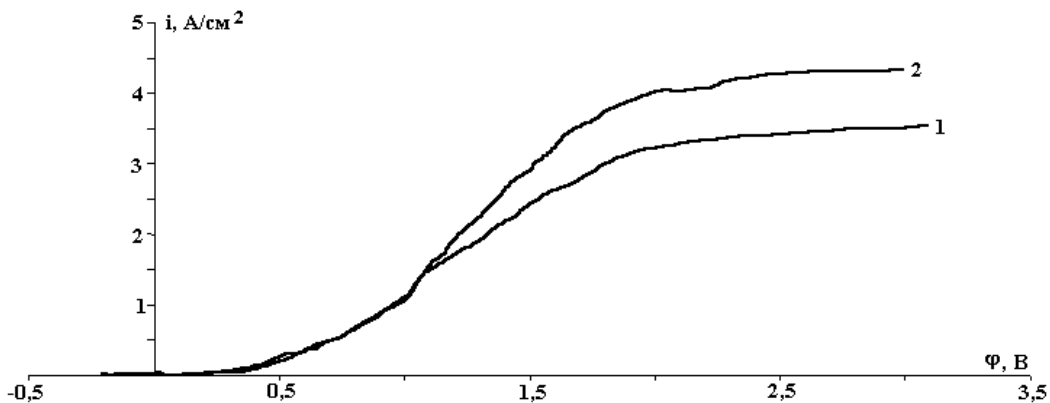


Рис. 4. Поляризационные потенциодинамические кривые в 10% NaNO<sub>3</sub> меди с УМЗ структурой (кривая 1), меди с крупнозернистой структурой (кривая 2).

Для УМЗ материалов, полученных методом интенсивной пластической деформации, характерны высоконеравновесные границы зерен со специфической дефектной структурой, большими свободными объемами и дальнедействующими напряжениями у границ, а также повышенной плотностью дислокаций внутри зерна [23]. Пограничные участки, являющиеся местами скопления дислокаций и примесей, образуют так называемые оксидные центры с повышенной потенциальной энергией. Ионы хлора имеют меньший радиус по сравнению с нитрат ионами и являются более подвижными, следовательно, легко диффундируют в поверхность, вытесняют кислород и взаимодействуют с металлом, переводя его в ионном состоянии в раствор, при этом адсорбция ионов хлора происходит по скоплению дислокаций как по границам, так и внутри зерна. Напротив, нитрат ионы менее активны, чем хлорид ионы и склонны пассивировать поверхность, адсорбируясь на этих же активных центрах.

**Влияние концентрации хлорида натрия на основные показатели электрохимической обработки УМЗ и крупнозернистой меди марки М1**

На рис. 5 представлены линейные скорости растворения, полученные при ЭХО меди в 5, 10, 15% растворах NaCl.

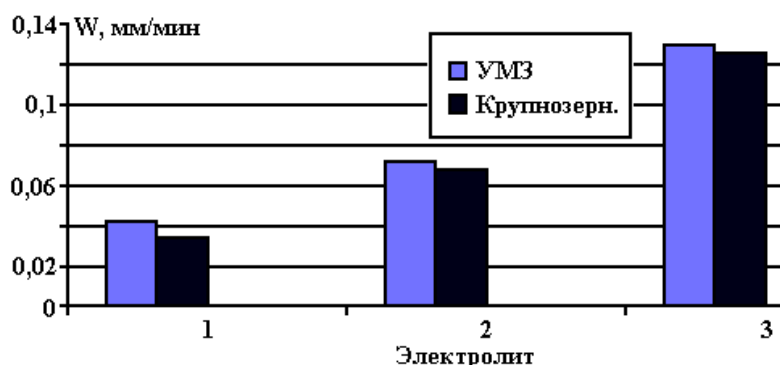


Рис. 5. Линейные скорости растворения ультрамелкозернистой и крупнозернистой меди М1 в хлориде натрия различной концентрации.

Как видно из рис. 5, в связи с увеличением электропроводности наблюдается повышение скорости съема с ростом концентрации хлорида натрия меди с УМЗ и крупнозернистой структурой, при этом медь с УМЗ структурой в электролитах на основе NaCl растворяется с несколько большими скоростями по сравнению с крупнозернистой структурой. В хлориде натрия медь растворяется в активной области, так как у меди с УМЗ структурой протяженность границ зерен значительно выше по сравнению с крупнозернистой структурой, а также вследствие повышенного содержания дефектов структуры, как по границам, так и внутри зерна, скорость растворения для УМЗ структуры несколько выше.

Рассмотрим, как влияет структура меди на выход по току. На рис. 6,а,б представлены значения выхода по току при расчете на двух- и одновалентную медь. Видно, что в расчете на двухвалентную медь выход по току для УМЗ структуры в 5 и в 10% NaCl достигают соответственно 274 и 225%, для крупнозернистой структуры в тех же электролитах выход по току составляет соответственно 232 и 212%. При расчете на одновалентную медь также наблюдаются высокие выходы по току, как для УМЗ структуры в 5 и в 10% NaCl соответственно 139 и 115%, так и для крупнозернистой структуры – 109 и 105%, что, по-видимому, обусловлено химическим окислением меди по реакции диспропорционирования.

Рассмотрим влияние УМЗ структуры меди на точность обработки в растворах хлорида натрия. На рис. 7 представлены значения коэффициентов локализации для меди с УМЗ и крупнозернистой структурой. Из рисунка видно, что наибольшая локализация обработки достигается в электролите 15% NaCl, как для УМЗ, так и для крупнозернистой структуры, однако локализация растворения меди с УМЗ структурой ниже.

Исследовалось влияние УМЗ структуры меди на качество поверхности в хлориде натрия в сравнении с крупнозернистой структурой. Показано (рис. 8), что высота микронеровностей для УМЗ структуры в 5 и в 10% NaCl значительно ниже, чем для крупнозернистой структуры.

Как видно из рис. 8, УМЗ структура меди М1 после ЭХО имеет более равномерную поверхность, что согласуется с данными работы [16] по исследованию коррозии УМЗ структуры меди, где показано, что УМЗ структура имеет более однородные коррозионные повреждения по сравнению с

крупнозернистым аналогом, обусловленные равномерным растворением, как границ зерен, так и тела зерна.

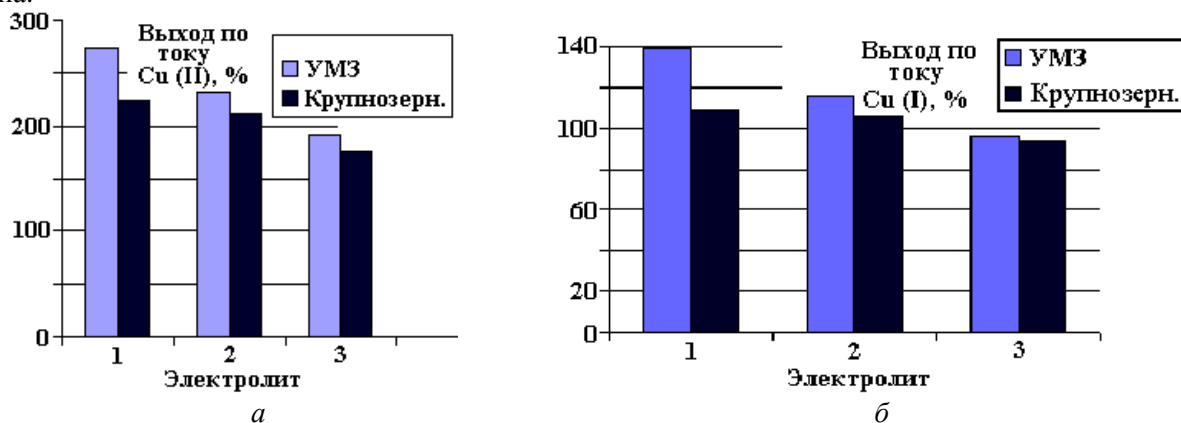


Рис. 6. Выход по току в расчете на двухвалентную медь (а), одновалентную медь при различных концентрациях хлорида натрия (б), %: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15.

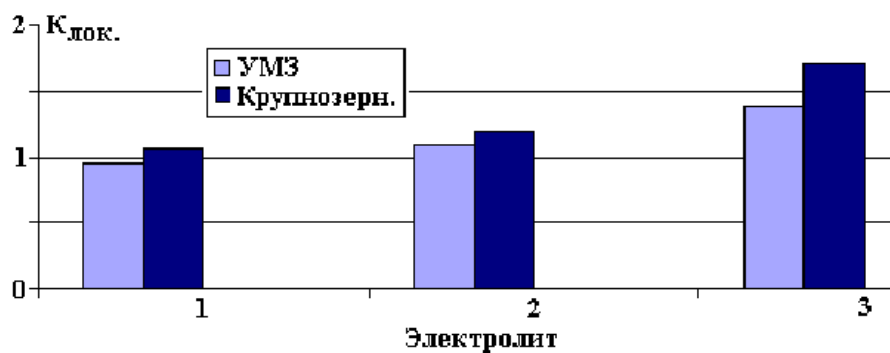


Рис. 7. Коэффициенты локализации при ЭХО меди с УМЗ и крупнозернистой структурами в растворах хлорида натрия различной концентрации: 1–5; 2–10; 3–15.

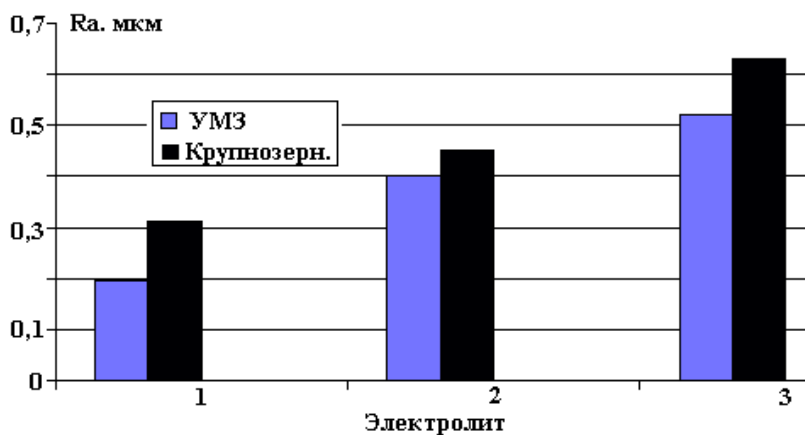


Рис. 8. Высота микронеровности (Ra) после ЭХО в растворах хлорида натрия различной концентрации %: 1–5; 2–10; 3–15.

**Влияние концентрации нитрата натрия на основные показатели электрохимической обработки УМЗ и крупнозернистой меди марки М1**

Медь растворяется со значительно более высокими скоростями в нитрате натрия по сравнению с хлоридом натрия. В 5% NaNO<sub>3</sub> скорость анодного растворения в 3,5 раза выше, чем в 5% NaCl (ср. рис. 5 и 9).

Как отмечалось выше, в растворах нитрата натрия медь растворяется в области анодно-анионной активации через пассивную пленку. Известно, что скорость растворения в этой области

значительно больше скорости растворения в активном состоянии. Как видно из рис. 9, в этом случае имеет место увеличение скорости растворения меди с крупнозернистой структурой в сравнении с УМЗ структурой. Данное поведение можно объяснить тем, что, как показано в работе [23], УМЗ структура характеризуется повышенным количеством дефектов и дальнедействующими напряжениями у границ, в то же время дефекты распределены равномерно как по границам зерен, так и в теле зерна, и на дефектах идут два конкурирующих процесса – активного растворения и пассивации [15], а склонность нитратов к пассивированию поверхности способствует снижению скорости растворения УМЗ структуры меди М1 в сравнении с крупнозернистым аналогом. Такая же картина наблюдается в 10 и 15% растворах нитрата натрия. С повышением концентрации нитрата натрия, где происходит более глубокая пассивация, различия в скоростях растворения УМЗ и крупнозернистой структуры меди М1 становятся более значительными.

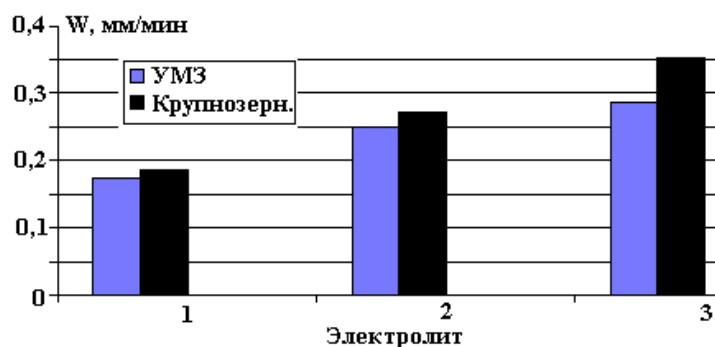


Рис. 9. Скорости анодного растворения УМЗ и крупнозернистой меди в нитрате натрия различной концентрации %: 1–5; 2–10; 3–15.

Рассмотрим влияние УМЗ структуры на выходы по току в нитрате натрия различной концентрации в сравнении с крупнозернистой структурой, которые представлены на рис. 10,а,б. Как видно, выход по току больше для меди с УМЗ структурой в электролитах на основе нитрата натрия. Сопоставляя величины выходов по току для меди в одно- и двухвалентной формах можно сделать вывод, что в отличие от высокоскоростного растворения в хлориде натрия, медь находится преимущественно в двухвалентной форме, так как растворение происходит через пассивную пленку.

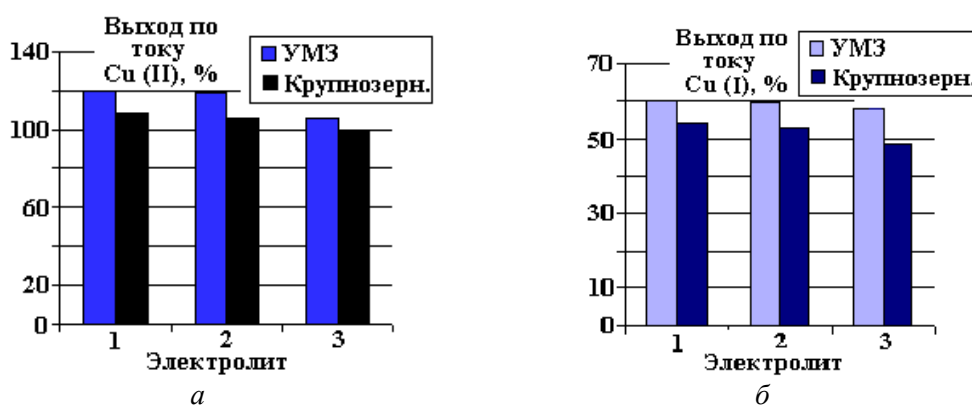


Рис. 10. Выход по току в расчете на двухвалентную медь (а), одновалентную медь в нитрате натрия различной концентрации (б), %: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15.

Рассмотрим влияние УМЗ структуры на точность обработки в нитрате натрия в сравнении с крупнозернистой структурой. Из рис. 11 видно, что коэффициент локализации с повышением концентрации нитрата натрия растет, особенно для УМЗ структуры. Так, уже в 5%  $\text{NaNO}_3$  на поверхности образуется пленка, при наличии которой локализация обработки значительно выше.

Рассмотрим влияние УМЗ структуры на качество поверхности в нитрате натрия, после ЭХО меди М1, в сравнении с крупнозернистой структурой. Из рис. 12 видно, что медь с УМЗ структурой характеризуется более низкими значениями коэффициента шероховатости по сравнению с крупнозернистой структурой и с увеличением концентрации, Ra для УМЗ структуры закономерно уменьшается, что, по-видимому, обусловлено равномерным ростом оксидных слоев на поверхности в связи

с равномерным распределением дефектов как по границам зерен, так и в теле зерна. Так в 10% нитрате натрия Ра для меди с УМЗ структурой составляет 0,21 мкм, в крупнозернистом состоянии – 0,46 мкм.

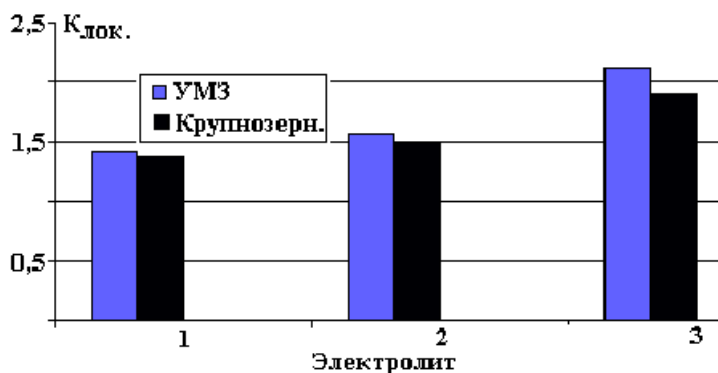


Рис. 11. Коэффициенты локализации при ЭХО меди растворами нитрата натрия различной концентрации, %: 1–5; 2–10; 3–15.

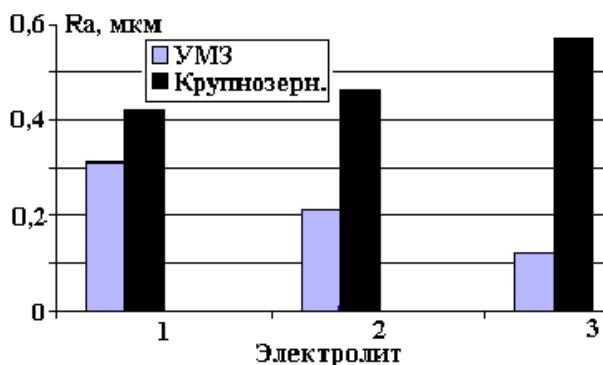


Рис.12. Высота микронеровности ( $Ra$ ) после ЭХО в растворах нитрата натрия различной концентрации, %: 1–5; 2–10; 3–15.

### Выводы

1. Для УМЗ материалов, полученных методом интенсивной пластической деформации, характерны высоконеравновесные границы зерен со специфической дефектной структурой, большими свободными объемами и дальнедействующими напряжениями у границ, а также повышенной плотностью дислокаций внутри зерна [23]. Пограничные участки, являющиеся местами скопления дислокаций и примесей, образуют так называемые оксидные центры с повышенной потенциальной энергией. Ионы хлора имеют меньший радиус по сравнению с нитрат-ионами и являются более подвижными, следовательно, легко диффундируют в поверхность, вытесняют кислород и взаимодействуют с металлом, переводя его в ионном состоянии в раствор. При этом адсорбция ионов хлора происходит по скоплению дислокаций как по границам, так и внутри зерна. Напротив, нитрат ионы менее активны, чем хлорид ионы и склонны пассивировать поверхность, адсорбируясь на этих же активных центрах.

2. Медь с УМЗ структурой в электролитах на основе NaCl растворяется с несколько большими скоростями по сравнению с крупнозернистой структурой. Наибольшая точность обработки достигается в электролите 15% NaCl как для УМЗ, так и для исходной структуры. УМЗ структура меди М1 после ЭХО имеет более равномерную поверхность, что согласуется с данными работы [16] по исследованию коррозии УМЗ структуры меди, где показано, что УМЗ структура имеет более однородные коррозионные повреждения по сравнению с крупнозернистым аналогом, обусловленные равномерным растворением как границ зерен, так и тела зерна.

3. Выявлено увеличение скорости растворения меди с крупнозернистой структурой в сравнении с УМЗ структурой в электролитах на основе нитрата натрия. Данное поведение можно объяснить тем, что, как показано в работе [23], УМЗ структура характеризуется повышенным количеством дефектов и дальнедействующими напряжениями у границ зерен. В то же время дефекты распределены равномерно как по границам зерен, так и в теле зерна, а на дефектах идут два конкури-



рующих процесса – активного растворения и пассивации [15]. Склонность нитратов к пассивированию поверхности способствует снижению скорости растворения УМЗ структуры меди М1 в сравнении с крупнозернистым аналогом. Выход по току больше для меди с УМЗ структурой в электролитах на основе нитрата натрия. Коэффициент локализации с повышением концентрации нитрата натрия растет, особенно для УМЗ структуры. Так, уже в 5%  $\text{NaNO}_3$  на поверхности образуется пленка, при наличии которой точность обработки значительно выше. Медь с УМЗ структурой характеризуется более низкими значениями коэффициента шероховатости по сравнению с крупнозернистой структурой и с увеличением концентрации, Ра для УМЗ структуры закономерно уменьшается, что, по-видимому, обусловлено равномерным ростом оксидных слоев на поверхности в связи с равномерным распределением дефектов как по границам зерен, так и в теле зерна, так, в 10% нитрате натрия Ра для меди с УМЗ структурой составляет 0,21 мкм, в крупнозернистом состоянии – 0,46 мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. // Progress in Materials Science 2000. 45. 2. P. 103–189.
2. Амирханов Н.М., Исламгалиев Р.К., Валиев Р.З. // Физика металлов и металловедение. 1998. Вып. 86. Т. 3. С. 99–105.
3. Исламгалиев Р.К., Салимоненко В.А., Шестаков Л.О., Валиев Р.З. // Изв. Вузов. Цветная металлургия. 1997. 6. С. 52–57.
4. Исламгалиев Р.К., Валиев Р.З. // Физика металлов и металловедение. 1999. Вып. 87. Т. 3. С. 46–52.
5. Валеев Р.З., Исламгалиев Р.К. // Физика металлов и металловедение. 1998. Вып. 85. Т. 3. С. 161–177.
6. Buhler H.-E., Schwenk W. // Z. Metallkunde. 1965. Bd. 56. S. 24–30.
7. Румак Н.В. Исследование поверхностного слоя пластически деформированных металлов при прокатке // Автореф. дис... канд. техн. наук. Минск, 1970.
8. Хор Т.П. Анодное поведение металлов // Новые проблемы современной электрохимии. Пер. с англ. М., ИЛ. 1962. С. 284–376.
9. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций / Пер. с англ. М., 1968.
10. Foroulis Z.A., Uhlig H.H. Effect of cold work on corrosion of iron and steel in hydrochloric acid // J. Electrochem. Soc. 1964. V. 111. № 5/6. P. 522–527.
11. Billing E. // Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 1956, v. 235, № 1200. P. 37–54.
12. Котрелл А.Х. Дислокации и пластические течения в кристаллах / Пер. с англ. М., 1958.
13. Акимов Г.В. Основы учения о коррозии и защите металлов. М., 1946.
14. Губкин С.Н. Теория обработки металлов давлением. М., 1947.
15. Мовчан Б.А., Ягупольская Л.Н. Влияние примесей на электрохимические свойства некеля // Защита металлов. 1969. Т. 5. № 5.
16. Vinogradov A., Mimaki T., Hashimoto S., Valiev R. Scripta Mater, 1999, 41. P. 319.
17. Rofagha R., Langer R., El-Sherik A.M., Erb U., Palumbo G., Aust K.T. Scripta Metall, 1991, 25. P. 2867.
18. Rofagha R., Erb U., Olander D., Palumbo G., Aust K.T., Nanostruct. Mater, 1993, 2. P. 1.
19. Thorpe S.J., Ramaswami B., Aust A.T. // J. Electrochem. Soc. (1988). 135. P. 2162.
20. Амирханова Н.А., Валиев Р.З., Исламгалиев Р.К., Балянов А.Г., Квятковская А.С. // Электронная обработка материалов, 2000. № 6. С. 16–22.
21. Алтухов В.К., Воронцов Е.С., Маршаков И.К. // Защита металлов. 1978. Т. 14. № 4. С. 477–480.
22. Vonfiglio C.H., Alvaja H.C., Gobo O.A. // Corros. Sci. 1973. V. 13. № 10. P. 717–724.
23. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М., 2000.

Поступила 25.09.2001

После переработки 08.11.2001

## Summary

The comparison of characteristics of anodic dissolution of copper M1 with ultra-micro-grained structure in a comparison with its coarse-grained analog under conditions of electrochemical machining of metals (ECM) has been carried out. The influence of material structure on ECM characteristics (machining rate, localization coefficient, surface finishing) in chloride and nitrate solutions with different concentrations is shown. It is shown that the influence of material structure is much higher in passivating electrolytes (nitrate solutions) due to the features of surface oxide films shaping.