

# Коррозионные и электрохимические свойства сплавов системы Ni-Re, легированных цирконием, гафнием, вольфрамом и палладием

В. В. Паршутин\*, А. М. Парамонов, А. В. Коваль

*Институт прикладной физики,  
г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, \*e-mail: [vlad.parshutin40@mail.ru](mailto:vlad.parshutin40@mail.ru)*

Поступила в редакцию 22.03.2022

После доработки 11.07.2022

Принята к публикации 15.07.2022

Исследована сравнительная коррозионная стойкость и электрохимическое поведение в кислых, щелочных и нейтральных средах как чистых металлов, так и никель-ренийевых сплавов, легированных цирконием, гафнием, вольфрамом и палладием. Установлено положительное влияние циркония на коррозионную стойкость сплава Ni-Re во всех исследуемых средах. Продемонстрировано, что легирование сплава Ni-Re гафнием также улучшает коррозионную стойкость и компенсирует ее уменьшение при введении в сплав вольфрама. Выявлено, что наибольшую коррозионную стойкость имеет сплав Ni-Re, легированный совместно цирконием и палладием.

*Ключевые слова:* коррозионная стойкость, никель-ренийевые сплавы, цирконий, гафний, вольфрам, палладий, испытания в агрессивных средах

УДК 621.9.047.7:669.018.8

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.4.55>

## ВВЕДЕНИЕ

Рений был открыт еще в 1925 г., однако его промышленное производство началось лишь в 50-е годы двадцатого века, когда на его основе были разработаны новые сплавы с заданным комплексом физико-механических свойств. За сравнительно короткий срок благодаря уникальным свойствам рений и его сплавы нашли широкое применение в различных областях современной техники: электронике, электротехнике, в авиа- и ракетостроении. В последние годы в больших масштабах началось его интенсивное применение и в нефтехимической промышленности в качестве катализатора.

В настоящее время в химической и электрохимической промышленности все чаще возникает потребность в литых материалах, обладающих комплексом свойств: высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах при достаточной прочности и формоустойчивости при комнатной и повышенной температурах, обеспечивающих возможность изготовления из этого материала полуфабрикатов в виде прутков, проволоки, ленты, фольги.

С целью расширения промышленного применения рения и его сплавов ведутся исследования их физико-механических [1–5] и противокоррозионных [6–9] свойств, особенностей анодного растворения [10–27, 30] и катодного осаждения [28, 29]. Изучение коррозионных процессов

проводилось как весовым [23], так и электрохимическими способами [27]. Исследования показали хорошую качественную сходимость результатов, которая может наблюдаться только в случае достижения условий, подробно изложенных в [9, 27].

В ряде случаев может представлять интерес коррозионная стойкость никель-ренийевых сплавов в сильноокислых коррозионно-активных средах, например, при переработке отходов, содержащих никель и рений [31].

Рений – наиболее эффективный упрочняющий легирующий элемент для жаропрочных никелевых сплавов, используемых для изготовления лопаток авиационных газотурбинных двигателей [32, 33]. Показано, что рений более эффективно, чем вольфрам, молибден и другие легирующие элементы, повышает прочность монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов. Также лопатки изготавливают из хромоникелевых сталей, легированных рением [24–26]. Дороговизна и сложность изготовления лопаток делает необходимым проведение исследований высокоскоростного анодного растворения упомянутых сплавов и сталей с целью развития методов их электрохимической обработки [24–26, 34].

В работах [24–26] установлено, что частичная замена вольфрама на рений в никель-хромовых сплавах приводит к депассивации, увеличению скорости анодного растворения и снижению

потенциала растворения при заданной плотности тока.

Высокая коррозионная стойкость циркония в горячей азотной кислоте любых концентраций, в кипящей серной кислоте (до 70%) и фосфорной кислоте (до 60%) определила его широкое применение в химическом машиностроении [3]. Известно, что катодное легирование с небольшими добавками электрохимически положительных металлов повышает пассивируемость и коррозионную стойкость многих сплавов [35]. Благородные металлы VIII группы привлекли к себе внимание своим уникальным комплексом физико-химических свойств, в том числе коррозионной стойкостью. Для промышленного применения одним из наиболее доступных среди них является палладий. Так как он еще не нашел себе достаточного применения, то основные усилия были направлены на создание новых сплавов, содержащих этот металл в небольших количествах в качестве катодной добавки [4].

*Цель работы* – исследование коррозионного и электрохимического поведения, физико-механических свойств сплавов на основе Ni-Re, легированных цирконием, палладием, вольфрамом и гафнием, и процесса высокоскоростного анодного растворения этих сплавов для последующей разработки способа их электрохимической обработки.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изготовления сплавов использовали порошковый рений чистотой 99,9%, полученный восстановлением из перрената аммония, дополнительно очищенный от легкоплавких и газообразных примесей плавкой в вакуумной дуговой печи; электролитический никель марки НЭ чистотой 99,9%, переплавленный в электронно-лучевой печи; йодидный цирконий чистотой 99,94%, переплавленный в вакуумной дуговой печи; йодидный гафний марки ГФИ2 чистотой 99,9%; металлокерамический вольфрам марки ВЧ; палладий марки ПД99,9. Все сплавы были изготовлены методом плавления в электродуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медном водоохлаждаемом поду в атмосфере очищенного гелия при остаточном давлении 200–300 мм рт. ст. Сплавы получали с использованием предварительно выплавленных лигатур. Экспериментальные трудности при выплавке тройных сплавов Ni-Re-Hf или Ni-Re-Zr определялись значительными различиями температур плавления и кипения, давления паров и величин удельных весов исходных компонентов. Например, получение гомогенного тройного сплава Ni-Re-Hf обеспечивалось шихтовкой двух лигатур: Ni-Re и

Ni-Hf. Слитки выплавлялись массой 20–40 г. Каждый слиток переплавляли 3–4 раза, чем достигалась равномерность состава по всему сечению. Однородность контролировали микроструктурным анализом и измерением твердости сплавов. Затем слитки отжигали при температуре 1000 °С в течение 2 часов и прокатывали в холодную с промежуточными отжигами при той же температуре. Время выдержки составляло от 1,5 часов до 15 минут в зависимости от толщины образца.

С учетом возможного воздействия макроскопического фактора [36] на процесс коррозии исследования велись на образцах одинакового размера в стаканах с одинаковым объемом коррозионной среды.

Коррозионные испытания металлов проводили при комнатной температуре путем полного погружения образцов в различные спокойные агрессивные среды при доступе воздуха. Скорость коррозии рассчитывали по изменению веса образцов размерами 10×20×0,2 мм, образцы шлифовали наждачной бумагой, выдерживали в течение суток в эксикаторе над свежeproкаленным CaCl<sub>2</sub>, а перед опытом обезжиривали в ацетоне и промывали дистиллированной водой. Время выдержки в кислотах не превышало часа, а в воде и растворах щелочи и хлористого натрия составляло 15 суток.

Анодные поляризационные кривые при малых токах снимали в потенциодинамическом режиме на плоских образцах без перемешивания с помощью потенциостата ПИ.50.1 со скоростью наложения потенциала 50 мВ/с. При больших плотностях тока потенциодинамические поляризационные кривые снимали на вращающемся дисковом электроде диаметром 3 мм со скоростью наложения потенциала 40 мВ/с на том же потенциостате при скоростях вращения 0–4000 об/мин в растворе NaCl концентрацией 50–200 г/л. В обоих случаях потенциалы измеряли относительно насыщенного хлоридсеребряного электрода с последующим пересчетом на нормальную водородную шкалу.

Все растворы приготовлены на дистиллированной воде из реактивов квалификации «ХЧ» и «ЧДА».

Состав сплавов определяли как до, так и после обработки методом локального рентгеноспектрального анализа с применением системы определения химического состава INCA Energy EDX. Особенность применявшегося метода анализа состава заключается в локальном определении концентрации элементов на площади 1–2 мкм<sup>2</sup> глубиной до 2 мкм. Анализ проводили в трех точках каждого образца. Для серий измерений рассчитывали средние

Таблица 1. Состав исследованных сплавов (вес.%)

Сплав	Ni	Re	Zr	Hf	W	Pd
Ni-0,4Zr	99,68±0,2	–	0,32±0,02	–	–	–
Ni-5Re	94,8±0,2	5,2±0,3	–	–	–	–
Ni-5Re-0,2Zr	94,82±0,2	4,95±0,2	0,23±0,01	–	–	–
Ni-10Re	90,14±0,16	9,86±0,4	–	–	–	–
Ni-10Re-0,4Zr	89,64±0,26	9,96±0,5	0,4±0,12	–	–	–
Ni-10Re-0,25Zr	89,69±0,2	10,1±0,2	0,21±0,03	–	–	–
Ni-10Re-1,0Zr	89,35±0,17	9,7±0,15	0,95±0,1	–	–	–
Ni-10Re-1,25Zr	88,89±0,25	9,9±0,25	1,21±0,04	–	–	–
Ni-15Re-0,25Zr	84,6±0,2	15,2±0,2	0,2±0,03	–	–	–
Ni-20Re	80,3±0,14	19,7±0,35	–	–	–	–
Ni-20Re-0,4Zr	80,17±0,2	19,45±0,24	0,38±0,08	–	–	–
Ni-10Re-0,25Zr-0,2Pd	89,52±0,3	10,1±0,15	0,2±0,02	–	–	0,18±0,03
Ni-5Re-0,2Zr-0,3Pd	94,64±0,2	4,9±0,2	0,22±0,02	–	–	0,24±0,03
Ni-15Re-0,25Zr-0,4Pd	84,234±0,3	15,1±0,21	0,23±0,02	–	–	0,43±0,02
Ni-10Re-0,2Hf	89,87±0,2	9,9±0,17	–	0,23±0,01	–	–
Ni-10Re-3W-0,1Hf	86,42±0,15	10,15±0,2	–	0,15±0,01	2,8±0,05	–
Ni-10Re-3W-0,3Hf	86,46±0,2	9,85±0,15	–	0,32±0,01	3,5±0,05	–

Таблица 2. Механические свойства сплавов

Сплав	Предел прочности, МПа		Относительное удлинение, %	Микротвердость, $H_{\mu}$ , МПа
	$\sigma_{\alpha}$ деф	$\sigma_{\alpha}$ отож		
Ni-10Re	1400	500	22	1400–1500
Ni-5Re-0,2Zr	1300	450	24	1300–1400
Ni-10Re-0,4Zr	1450	550	22	1450
Ni-10Re-1,0Zr	1550	600	20	1650
Ni-15Re-0,25Zr	1600	650	19	1600
Ni-20Re-0,4Zr	1850	800	15	1950
Ni-5Re-0,2Zr-0,3Pd	1300	450	–	1300–1400
Ni-10Re-1,0Zr-0,2Pd	1500	550	–	1600
Ni-15Re-0,25Zr-0,4Pd	1600	600	–	1500–1600
Ni-10Re-0,1Hf	–	–	–	2160
Ni-10Re-0,2Hf	–	–	–	2130

Таблица 3. Влияние добавок к никелю Re и Zr на изменение межплоскостного расстояния  $d_{[111]}$ 

$d_{[111]}$ , Å	Ni литой	Ni фольга неотож.	Ni фольга отож.	Ni-0,1Zr	Ni-10Re	Ni-10Re-0,1Zr	Ni-20Re-0,1Zr
		2,03 <sub>4</sub>	2,03	2,03 <sub>2</sub>	2,03 <sub>5</sub>	2,04 <sub>4</sub>	2,04 <sub>4</sub>
Полуширина дифракционной линии (2 $\theta$ )	0,40	–	0,38	0,38	0,55	0,43	0,52

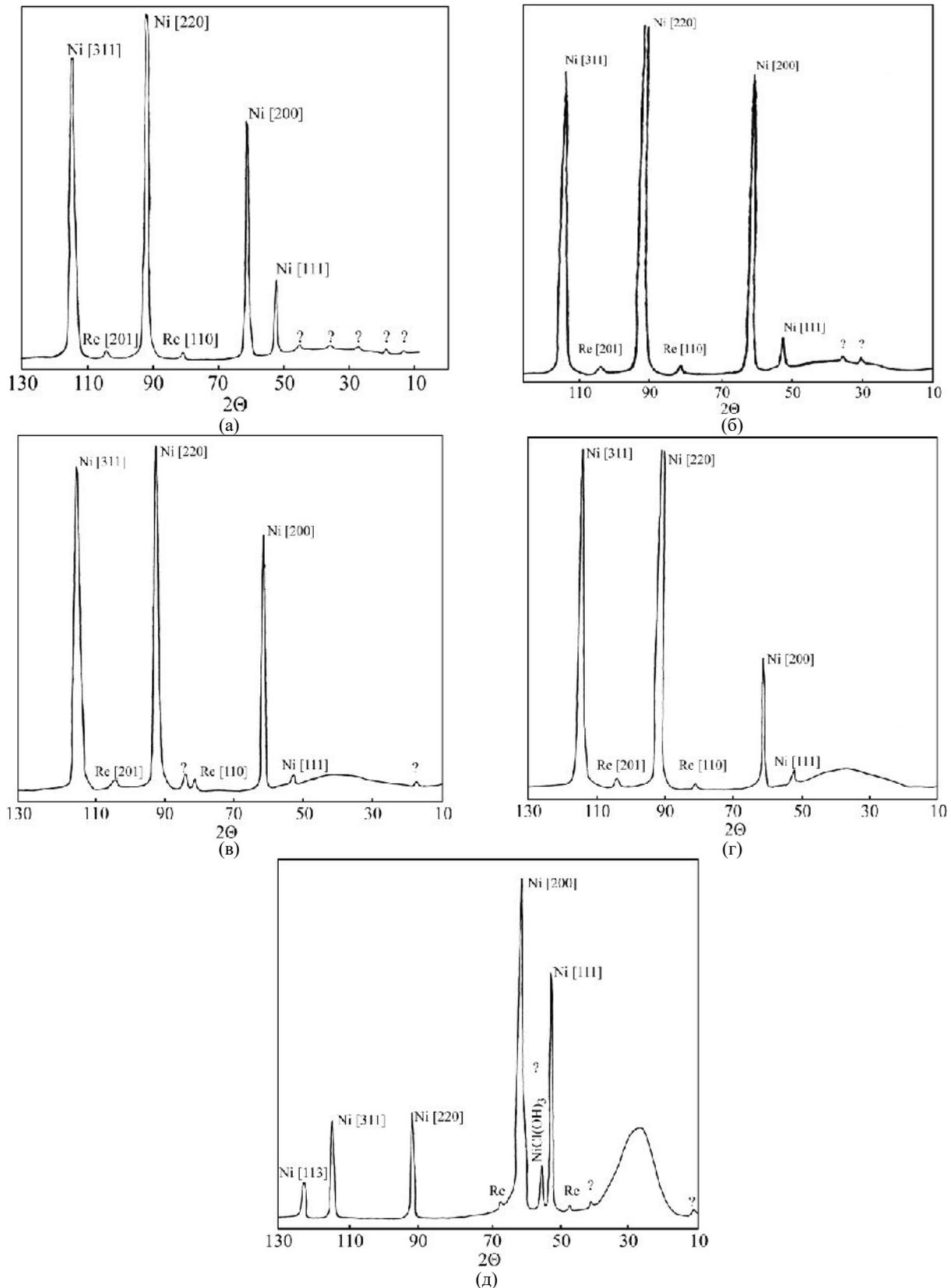
значения. Состав сплавов приведен в табл. 1. Морфологию обработанной поверхности изучали на сканирующем электронном микроскопе Mini-Sem.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучаемые сплавы представляют собой твердый раствор на основе никеля с ОЦК-решеткой. В табл. 2 показаны физико-механические свойства исследуемых сплавов. Совместное легирование никеля рением и цирконием приводит к упрочнению твердого раствора за счет дополнительного искажения кристаллической решетки никеля (табл. 2 и 3). При этом сохраняются достаточно высокие пластичность и

технологичность сплавов. Как видно из табл. 3, добавка 0,1% Zr практически не меняет структурного состояния никелевого образца. Введение в него 10 и 20% рения несколько раздвигает атомные плоскости и ухудшает степень кристалличности образцов – возрастают межплоскостные расстояния  $d_{[111]}$  и полуширины дифракционных линий. Дифракционные спектры никелевой фольги неотоженной и отожженной отличаются лишь наличием в последнем еще одной фазы – окисла никеля NiO.

Предел прочности тройного сплава примерно на 15% превышает прочность сплава Ni-10Re в деформированном состоянии и на 25% – в отожженном. При этом пластичность и технологичность сохраняются на уровне, характерном



**Рис. 1.** Диффрактограммы сплавов Ni-10Re до коррозии (а) и после коррозии в 48%-й  $H_2SO_4$  (б), в концентрированных HCl (в),  $HNO_3$  (г), царской водке (д).

для сплава Ni-10Re. Микротвердость сплава не ниже, а при некоторых соотношениях компонентов даже выше, чем у сплава Ni-10Re.

Коррозия всех испытанных металлов и сплавов носит равномерный характер, местных

разрушений (язв, питтингов) не обнаружено, отсутствует также и межкристаллитная коррозия.

Минимальная коррозия металлов наблюдается в неокислительных кислотах ( $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$  и HCl), тогда как в окислительной кислоте

Таблица 4. Влияние кислот при комнатной температуре на скорость коррозии металлов, г/м<sup>2</sup>·ч

Сплав	48%-я H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Концентрированная			3 об. HCl + 1 об. HNO <sub>3</sub>
		H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	HCl	HNO <sub>3</sub>	
Ni	0	0	9,45	424,5	100,5
Re	0,225	0,45	1,2	226,05	6,55
Hf	0,35	0	0,11	0,018	51,32
Zr	0,3	0	0,08	0,04	81,1
W	0,3	0	6,75	4,5	18,0
Ni-0,4Zr	0,12	0,45	2,7	7,05	114,0
Ni-5Re	0,38	0,1	7,05	33,0	22,4
Ni-5Re-0,2Zr	0,27	0,05	8,1	34,1	20,5
Ni-10Re	0,45	0,2	7,95	27,0	28,6
Ni-10Re-0,4Zr	0,3	0,1	5,1	18,5	19,3
Ni-10Re-0,25Zr	0,25	0	4,0	15,1	11,4
Ni-10Re-1,0Zr	0,13	0	2,8	10,5	7,5
Ni-10Re-1,25Zr	0,23	0,19	4,4	16,4	15,1
Ni-15Re-0,25Zr	0,18	0	3,2	13,5	16,4
Ni-20Re	0,9	0,3	1,9	237,3	314,0
Ni-20Re-0,4Zr	0	0	1,7	201,2	263,1
Ni-10Re-0,25Zr-0,2Pd	0	0,1	0,15	35,1	47,2
Ni-5Re-0,2Zr-0,3Pd	0	0	0	37,4	49,4
Ni-15Re-0,25Zr-0,4Pd	0	0	0	39,6	54,3
Ni-10Re-0,2Hf	0	0	0	16,5	87,0
Ni-10Re-3W-0,1Hf	0,9	0	8,25	50,25	349,5
Ni-10Re-3W-0,3Hf	0,7	0	4,1	48,2	351,2

(HNO<sub>3</sub>) и ее смеси с соляной кислотой скорость коррозии возрастает во много раз (табл. 4).

Все исследованные нами сплавы содержат от 5 до 20 вес.% Re в своем составе и попадают в область твердых растворов. Можно заранее предположить, что существенное влияние на скорость коррозии сплавов будет оказывать селективное растворение, так как вторая фаза отсутствует и система является гомогенной. Скорость коррозии сплавов может изменяться из-за обогащения в результате коррозии поверхности более термодинамическим стабильным элементом. Таким компонентом является рений.

Коррозия сплавов никель–рений в 48%-й неокислительной кислоте H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> невысока, но выше, чем самого никеля, который в этой среде не корродирует. Она возрастает с увеличением концентрации рения, менее стойкого в этой среде (табл. 4). Это подтверждается данными рентгеновского анализа (рис. 1а,б). Так, на рентгенограммах сплава Ni-10Re заметно некоторое ослабление линий [311] и [111]. Несколько ослаблены и линии рения. Наблюдаются два слабых неидентифицированных пика с  $d = 2,928 \text{ \AA}$  и  $d = 3,458 \text{ \AA}$ .

В другой неокислительной кислоте – концентрированной HCl коррозия сплавов имеет особенности. Как следует из табл. 4, введение рения в никель приводит к существенному снижению скорости коррозии тем больше, чем

выше концентрация рения. Это может быть объяснено обогащением поверхности рением в результате избирательного растворения никеля, что подтверждается и рентгенограммой (рис. 1в). На ней видно заметное уменьшение интенсивности рефлексов никеля от плоскостей [311] и [200] по сравнению с необработанным образцом и очень сильное – от плоскости [111]. В то же время интенсивность рефлексов от плоскости [220] остается на прежнем уровне. Появляются новые рефлексы (на электронограммах также), свидетельствующие о формировании дополнительной фазы, по-видимому, гидроксилхлорида Ni<sub>2</sub>Cl(OH)<sub>3</sub> и оксида ReO<sub>3</sub>. Система INCA Energy EDX фиксирует в поверхностном слое наличие хлора – 0,25±0,1 вес.%. Появляется область высокого диффузионного фона (размытый максимум с  $d = 2,617 \text{ \AA}$ , свидетельствующий об образовании аморфных фаз).

В концентрированной азотной кислоте, являющейся сильно окислительной кислотой, и сплавы никель–рений, и их компоненты очень неустойчивы, хотя скорость травления сплавов на порядок ниже, чем у компонентов. При этом сплавы с 5 и 10% рения травятся с близкими скоростями, но введение в никель 20% рения резко снижает стойкость сплава. На рентгенограмме (рис. 1г) сплава обнаружено заметное уменьшение рефлексов никеля по сравнению с нетравленным образцом от плоскости [200] и

очень сильное – от плоскости [111]. Интенсивности рефлексов от плоскостей [311] и [220] остаются без изменений. Появляется область высокого диффузного фона (интенсивность диффузного пика выше, чем при травлении в соляной кислоте), говорящая о присутствии в поверхностном слое аморфных фаз. Размытый максимум имеет  $d = 2,897 \text{ \AA}$ .

Царская водка, являющаяся смесью окислительной  $\text{HNO}_3$  и неокислительной  $\text{HCl}$  кислот, необычайно активна. Как известно, в ней растворяются даже золото и платина. Однако никель корродирует в ней со скоростью в 4 раза, а рений более чем в 30 раз меньшей, чем в азотной кислоте. С добавлением рения в никель в количестве 5 и 10% сплав корродирует с близкими скоростями, раза в 4 меньшими, чем чистый никель. Но при увеличении содержания рения до 20% скорость коррозии сплава резко возрастает (на порядок), как в азотной кислоте.

На рентгенограммах (рис. 1д) обнаруживается очень сильное уменьшение интенсивностей рефлексов никеля от плоскостей [311] и [220] по сравнению с образцом, не подвергшимся коррозии. Появляются новые рефлексы, которые можно отнести к гидроксилхлориду  $\text{Ni}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ , гидроксидгидрату  $3\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , гидроксиду  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  или оксиду  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ . Система INCA Energy EDX фиксирует в поверхностном слое наличие хлора –  $2,3 \pm 0,2$  вес.%. Формируется область высокого диффузного фона, интенсивность которого значительно выше, чем при травлении в азотной кислоте. Это свидетельствует о наличии аморфных фаз. Размытый максимум имеет  $d = 3,83 \text{ \AA}$ . Электронограммы указывают на появление только гидроксилхлорида  $\text{Ni}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ .

Как видно из табл. 4, легирование никеля рением почти не ухудшает коррозионную стойкость никеля во всех исследованных средах, а в концентрированной  $\text{HNO}_3$  повышает ее более, чем на порядок.

Легирование никеля цирконием снижает коррозионную стойкость сплава по сравнению с Ni в 48%-й  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , концентрированной  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и царской водке, зато повышает ее в концентрированных  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$ . Одновременно видно, что совместное легирование никеля рением и цирконием приводит к существенному увеличению коррозионной стойкости сплавов в нейтральных, щелочных и кислых средах по сравнению со сплавом Ni-Re.

Увеличение содержания рения в сплавах выше 15 вес.% нецелесообразно, так как повышение количества рения, не ухудшая коррозионной стойкости в щелочной и нейтральной средах, резко снижает ее в кислой среде. Одновременно значительно ухудшается техноло-

гичность сплава, а стоимость полуфабрикатов из него в связи с уменьшением выхода готовой продукции увеличивается в 2–6 раз.

Снижение количества рения ниже 5 вес.% нежелательно, поскольку при этом резко ухудшаются механические свойства сплавов. Так, предел прочности сплава с 2 вес.% рения составляет в деформированном состоянии 1180, а в отожженном – 420 МПа, что очень близко к соответствующим характеристикам нелегированного никеля (1150 и 400 МПа соответственно).

Легирование цирконием выше 1 вес.% приводит к уменьшению коррозионной стойкости и ухудшению пластичности и обрабатываемости механическим способом вследствие выделения по границам зерен твердого раствора значительного количества второй фазы (металлическое соединение  $\text{Ni}_5\text{Zr}$ ). Уменьшение содержания циркония в сплавах ниже 0,2 вес.% уничтожает эффект повышения коррозионной стойкости тройных сплавов.

Легирование сплавов Ni-Re цирконием увеличивает их стойкость во всех кислотах, что особенно заметно в концентрированной азотной кислоте и царской водке, в которых очень нестоек никель. Скорость коррозии сплавов в нейтральных растворах и растворах щелочи (табл. 5) намного меньше наблюдаемых в кислотах. Легирование цирконием еще более увеличивает стойкость сплавов.

Как видно из приведенных данных, легирование сплавов гафнием, аналогом циркония, приводит к близким результатам даже при наличии в сплавах вольфрама.

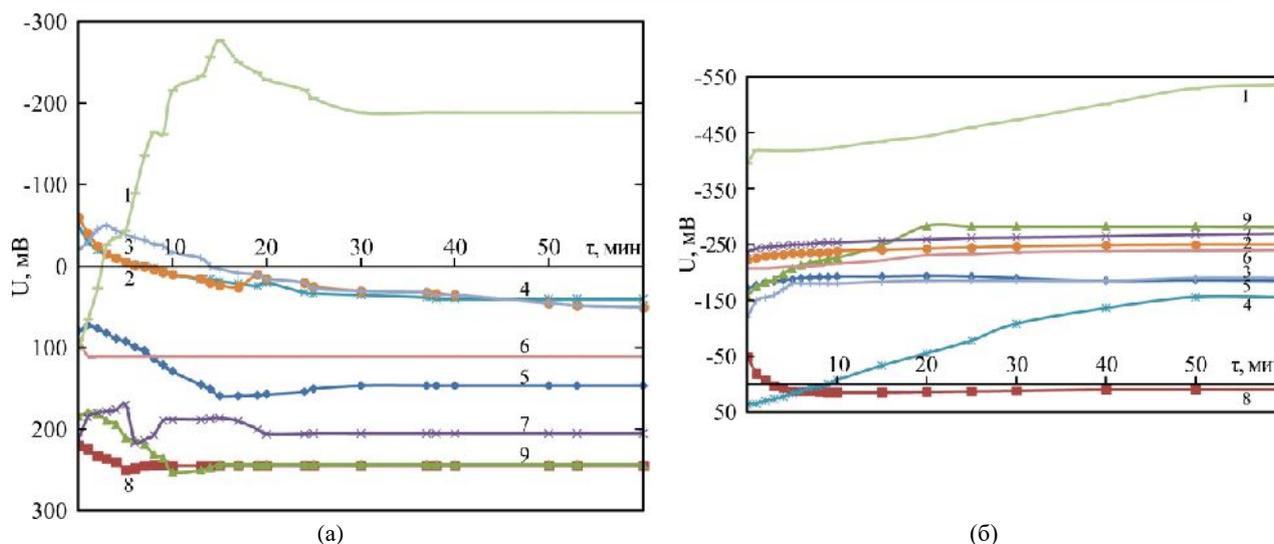
Дополнительное введение в тройной сплав Ni-Re-Zr палладия мало сказывается на прочностных характеристиках сплава, но повышает его коррозионную стойкость в 48%-й серной кислоте, концентрированных фосфорной и соляной кислотах, практически не увеличивая ее в концентрированной азотной кислоте и царской водке.

Из данных табл. 4 и 5 видно, что коррозионные потери всех сплавов, да и отдельных металлов, в растворах  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaOH}$  и в воде значительно меньше наблюдаемых в кислотах.

Стационарный потенциал циркония в 48%-й серной кислоте в момент погружения равен +101 мВ (рис. 2а). За 15 минут он резко смещается в отрицательную сторону до значения –277 мВ, а затем медленно сдвигается в положительную сторону, достигая к часу испытаний величины –189 мВ. Потенциалы рения лежат в положительной области, в момент погружения потенциал равен +90 мВ, и со временем он быстро смещается в положительную сторону до

**Таблица 5.** Влияние нейтральной и щелочной среды при комнатной температуре на скорость коррозии металлов, г/(м<sup>2</sup>·ч)

Сплав	Вода	20% NaCl	20% NaOH
Ni	$1,2 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-3}$
Re	$0,19 \times 10^{-3}$	$1,56 \times 10^{-3}$	$2,08 \times 10^{-3}$
Hf	$0,15 \times 10^{-3}$	$3,12 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Zr	$0,13 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$6,2 \times 10^{-3}$
W	$0,2 \times 10^{-3}$	$0,83 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$
Ni-5Re	$1,15 \times 10^{-3}$	$4,81 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-3}$
Ni-5Re-0,2Zr	$0,9 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$
Ni-10Re	$0,52 \times 10^{-3}$	$4,78 \times 10^{-3}$	$4,69 \times 10^{-3}$
Ni-10Re-0,4Zr	$0,3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$
Ni-10Re-0,25Zr	$0,15 \times 10^{-3}$	$0,7 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Ni-10Re-1,0Zr	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$
Ni-10Re-1,25Zr	$0,09 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$9,5 \times 10^{-3}$
Ni-15Re-0,25Zr	$0,11 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-3}$
Ni-20Re	$0,17 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-3}$	$1,88 \times 10^{-3}$
Ni-20Re-0,4Zr	$0,2 \times 10^{-3}$	$0,7 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$
Ni-10Re-0,25Zr-0,2Pd	0	$0,2 \times 10^{-3}$	0
Ni-5Re-0,2Zr-0,3Pd	0	$0,12 \times 10^{-3}$	$0,3 \times 10^{-3}$
Ni-15Re-0,25Zr-0,4Pd	0	0	0
Ni-10Re-0,2Hf	$0,25 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-3}$	0
Ni-10Re-3W-0,1Hf	$0,48 \times 10^{-3}$	$3,23 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-3}$
Ni-10Re-3W-0,3Hf	$0,37 \times 10^{-3}$	$1,46 \times 10^{-3}$	0



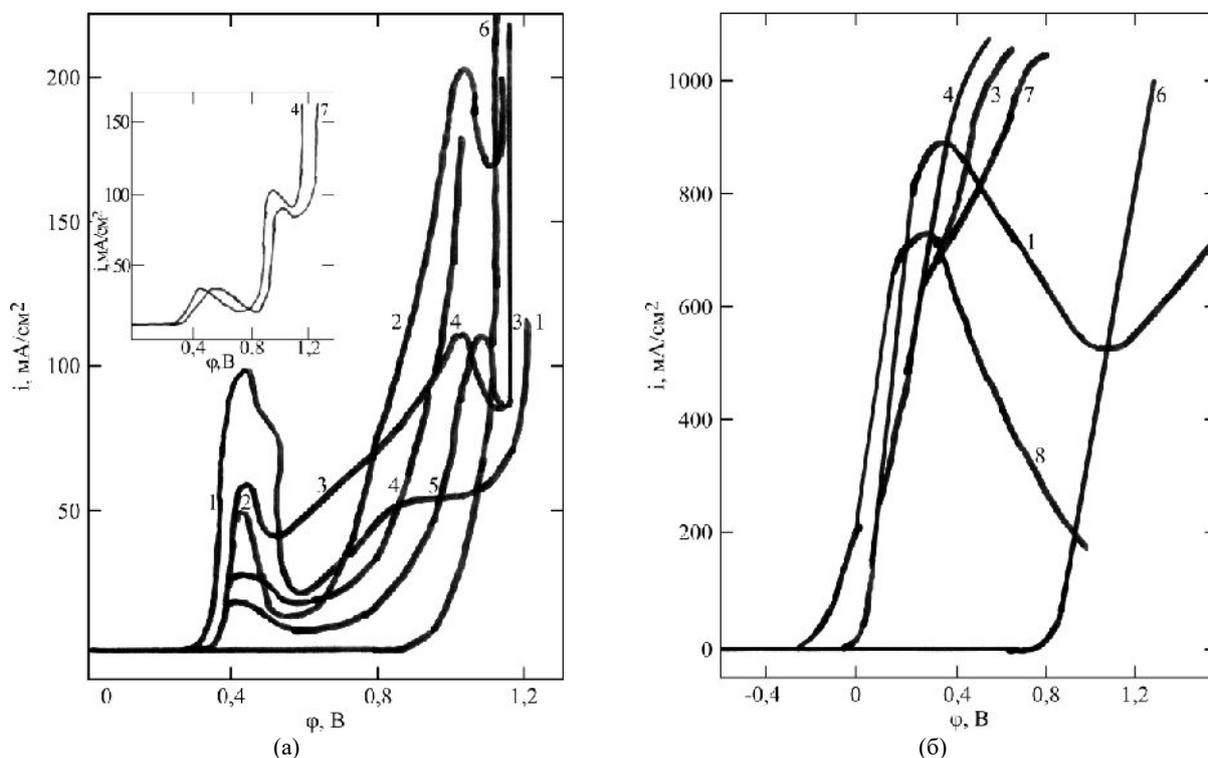
**Рис. 2.** Изменение стационарных потенциалов во времени в 48%-й H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (а) и 20%-м NaCl (б) металлов: 1 – Zr; 2 – Ni-10Re, 3 – Ni-10Re-0,2Hf; 4 – Ni; 5 – Ni-0,4Zr; 6 – Re; 7 – Ni-10Re-0,4Zr; 8 – Ni-20Re-0,4Zr; 9 – Ni-10Re-0,25Zr.

+110 мВ и потом остается постоянным до конца испытаний. Потенциалы никеля и сплавов Ni-10Re и Ni-10Re-0,2Hf отрицательнее, чем потенциал рения, в момент погружения образца в среду они соответственно равны –50 мВ, –60 мВ, –20 мВ, а с течением времени сдвигаются еще положительнее. При этом потенциалы никеля и сплава Ni-10Re примерно через 7 минут, а сплава Ni-10Re-0,2Hf через 30 минут становятся практически равными.

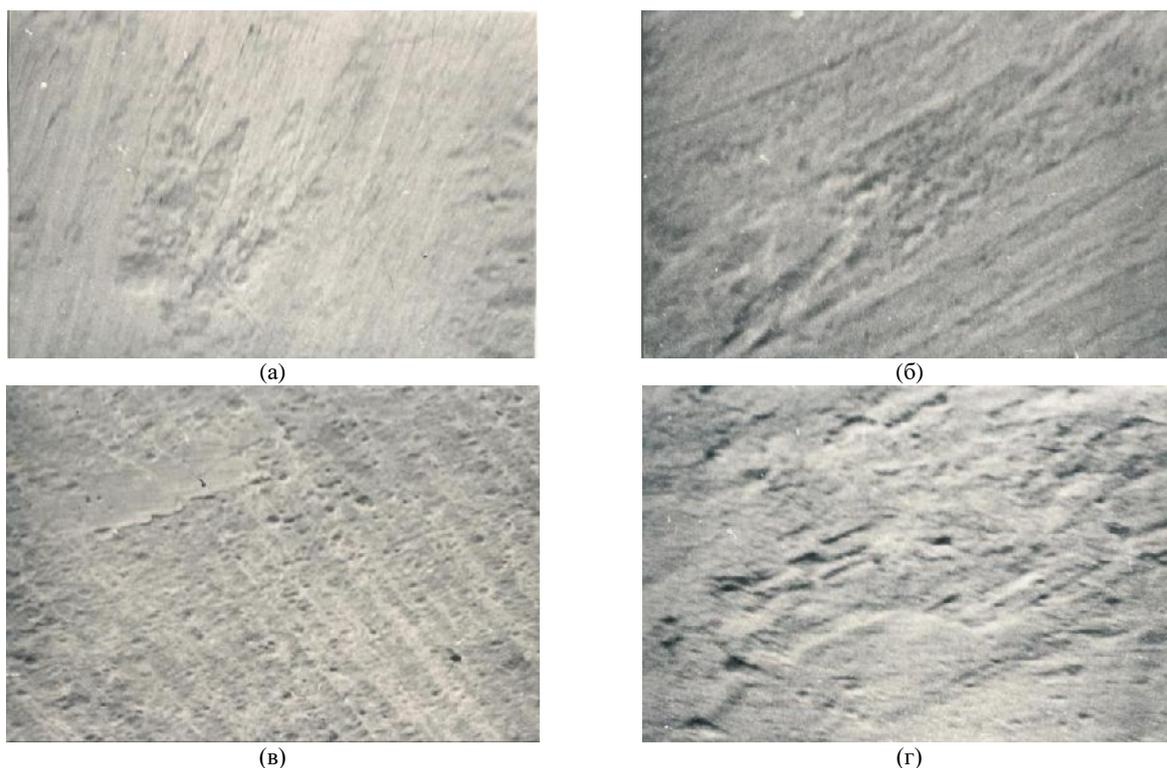
Легирование никеля цирконием приводит к сдвигу потенциала в положительную сторону (в момент погружения +79 мВ против –50 мВ у никеля), который изменяется до значения

+159 мВ при 15 минутах, а потом остается практически постоянным. Введение циркония в сплав Ni-10Re сдвигает потенциал сплава в положительную сторону тем больше, чем выше содержание легирующего компонента. Интересно отметить, что значения потенциалов сплава Ni-20Re-0,4Zr после 10 минут испытаний практически совпадают со значениями потенциалов сплава Ni-10Re-0,25Zr.

В 20%-м NaCl наиболее отрицательный потенциал наблюдается у циркония (рис. 2б). В момент погружения он равен –396 мВ и со временем медленно сдвигается в отрицательную сторону, достигая за 60 минут значения –536 мВ.



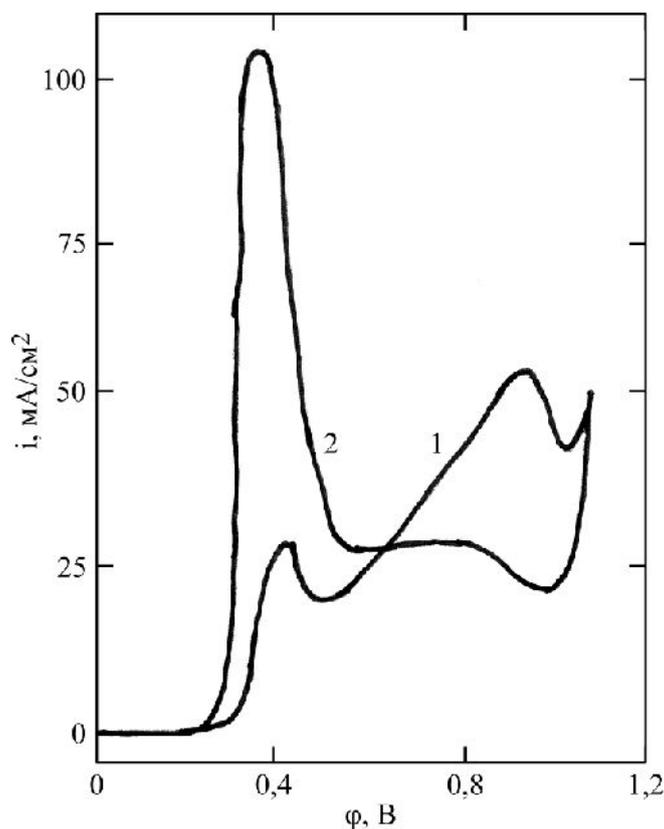
**Рис. 3.** Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения в 48%-й H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (а) и 20%-м NaCl (б) металлов: 1 – Ni; 2 – Ni-10Re-0,25Zr; 3 – Ni-20Re-0,4Zr; 4 – Ni-10Re; 5 – Ni-10Re-0,4Zr; 6 – Re; 7 – Ni-10Re-0,2Hf; 8 – Ni-10Re-3W-0,1Hf.



**Рис. 4.** Морфология поверхности сплава Ni-10Re-0,4Zr в 48%-й H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при потенциалах, В: (а) – 0,450; (б) – 0,600; (в) – 0,900; (г) – 1,250 ( $\times 1000$ ).

Потенциал рения в момент погружения образца в среду равен  $-208$  мВ, затем незначительно сдвигается в отрицательную сторону, достигая за 60 минут значения  $-240$  мВ. У сплава Ni-10Re потенциалы несколько отрицательнее, чем у рения. Введение циркония в этот сплав сдвигает потенциалы еще отрицательнее, при

этом тем больше, чем выше содержание циркония в сплаве. Хотя гафний является аналогом циркония, добавка его в сплав Ni-10Re, в отличие от циркония, сдвигает в положительную сторону значения потенциалов. Потенциал никеля положительнее, чем у рения, и в момент погружения равен  $+36$  мВ, с течением



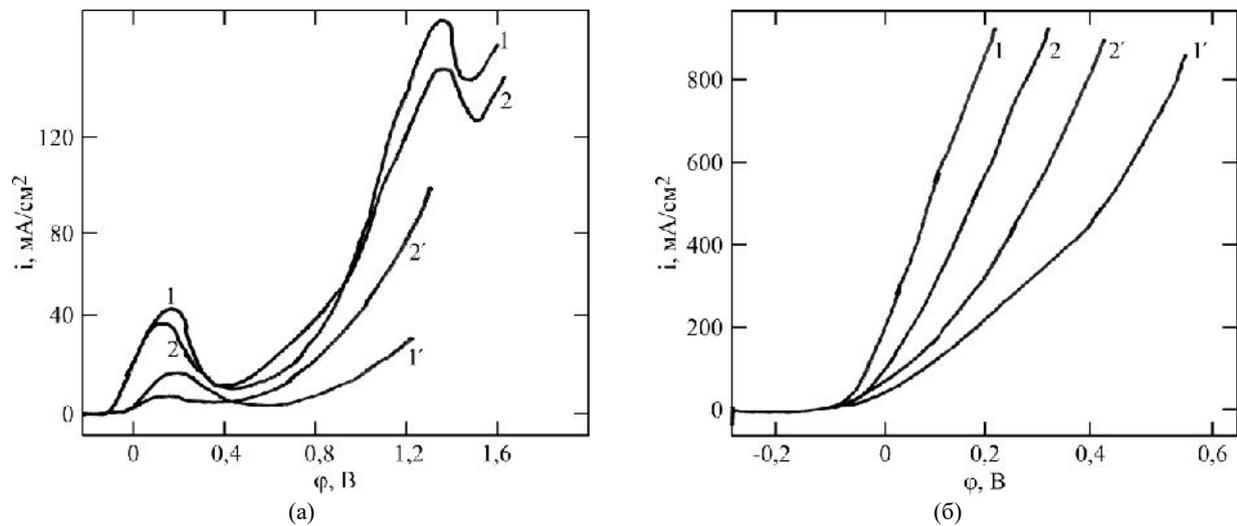
**Рис. 5.** Потенциодинамические кривые анодного растворения сплава Ni-10Re-0,4Zr в 48%-й  $H_2SO_4$  (1) и с добавлением 5 г/л KCl (2).

времени сдвигается в отрицательную сторону, достигая за 50 минут испытаний значения  $-156$  мВ, оставаясь далее практически неизменным. Введение в никель 0,4% Zr приводит к резкому сдвигу в отрицательную сторону со временем, особенно до 50 минут выдержки. Наиболее положительные значения потенциалов (как и в 48%-й серной кислоте) наблюдаются у сплава Ni-20Re-0,4Zr.

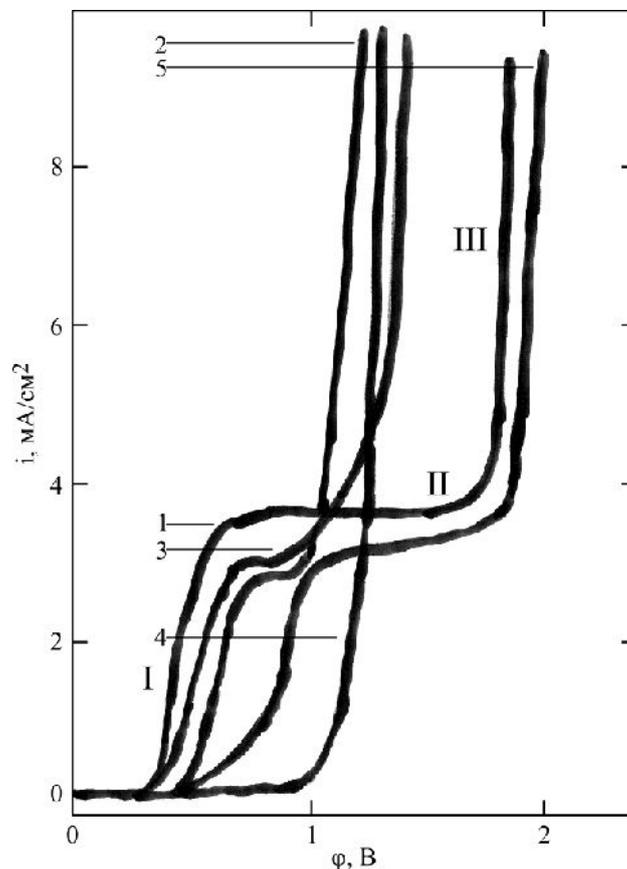
Судя по потенциодинамическим поляризационным кривым (рис. 3а), рений (кривая б) начинает растворяться в 48%-й серной кислоте при потенциале, близком к 1,0 В, значительно более положительном, чем потенциалы активного растворения никеля и его сплавов с рением. На поляризационной кривой анодного растворения никеля наблюдаются участки активного растворения, активно-пассивного перехода, пассивная и транспассивная области (кривая 1). Механизм растворения никеля в этих условиях подробно описан в [20].

Поляризационные кривые сплавов имеют более сложную форму, чем у никеля – с двумя пиками (рис. 3а). Активное растворение начинается при потенциалах, несколько более положительных, чем у никеля. Первый пик соответствует растворению никеля, который переходит в раствор в виде  $Ni^{2+}$ . В области активного растворения на рентгенограммах фиксируется усиление рефлексов рения и

уменьшение – никеля, что также свидетельствует о вытравливании с поверхности образца никеля и накоплении рения, тем более что в растворе рений практически не обнаруживается. Активно-пассивный переход на сплавах Ni-Re начинается примерно при тех же потенциалах, что и у никеля. Падение тока обусловливается образованием на поверхности пористой пленки, состоящей из NiO. На поляризационной кривой сплава Ni-10Re пик активно-пассивного перехода значительно меньше, чем у никеля, токи в пассивной области меньше, а транспассивная область сдвинута в отрицательную сторону (кривая 4). Введение в сплав Ni-10Re 0,4% циркония уменьшает пик активно-пассивного перехода (кривая 5), удлиняя протяженность пассивной области и снижая величину тока пассивации, сдвигая транспассивную область положительнее. При добавлении в сплав Ni-10Re 0,25% циркония наблюдается несколько иная картина (кривая 2). Токи в пике активно-пассивного перехода не менее чем в 2 раза превышают таковой у сплава Ni-10Re, а область транспассивного растворения сдвинута в отрицательную сторону. Введение в сплав Ni-10Re 0,2% гафния, не меняя характера поляризационной кривой, сдвигает ее в положительную сторону (кривые 4 и 7). У сплава Ni-20Re-0,4Zr наблюдается самое большое из сплавов значение тока в пике активно-пассивного перехода и наименьшая



**Рис. 6.** Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения: (а) – в 48%-й  $H_2SO_4$  сплавов Ni-10Re-0,2Hf (1) и Ni-10Re (2) в деформированном (1 и 2) и отожженном (1' и 2') состояниях; (б) – в 20%-м NaCl сплавов Ni-10Re (1) и Ni-10Re-0,2Hf (2) в деформированном (1 и 2) и отожженном (1' и 2') состояниях.

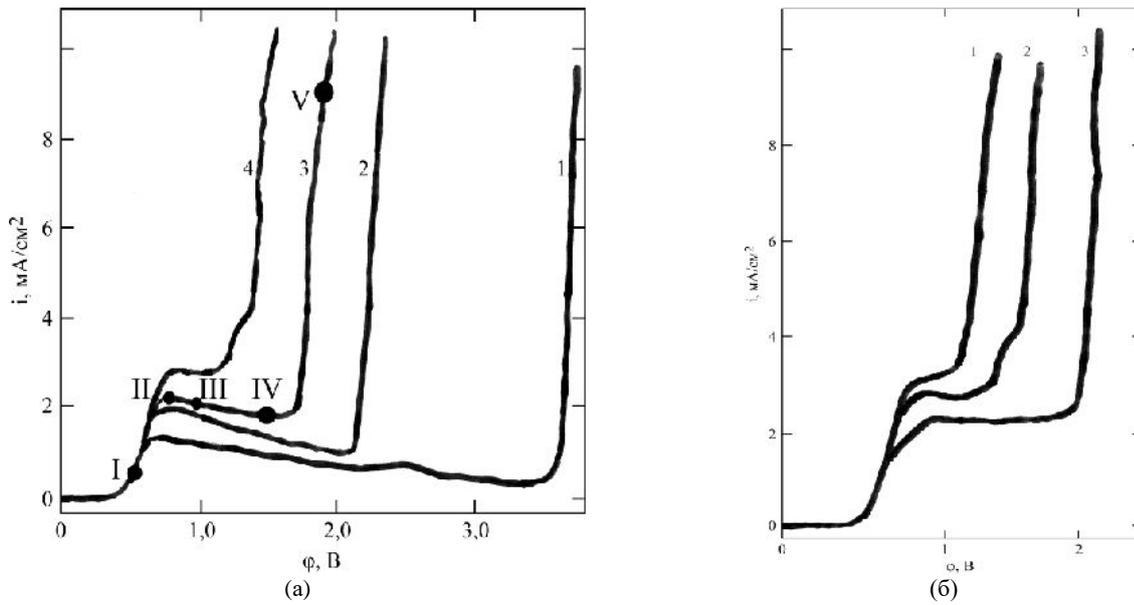


**Рис. 7.** Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения в 100 г/л NaCl при  $n = 2000$  об/мин металлов: 1 – Ni; 2 – Ni-10Re-0,4Zr; 3 – Ni-10Re; 4 – Re; 5 – Ni-10Re-0,25Zr-0,2Pd.

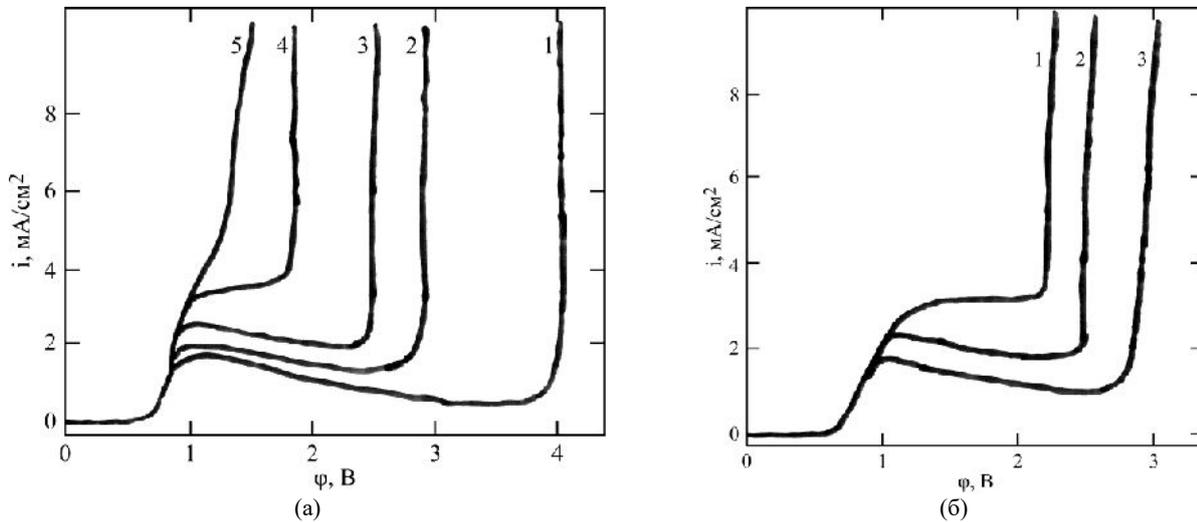
протяженность пассивной области, зато транспассивное растворение начинается положительнее активного растворения рения (кривая 3). Морфология поверхности сплава Ni-10Re-0,2Hf в 48%-й серной кислоте представлена на рис. 4.

Введение в 48%-ю серную кислоту даже небольшого количества KCl (5 г/л) значительно увеличивает значения тока в первом пике, приводя к большему вытравливанию никеля из сплава (рис. 5).

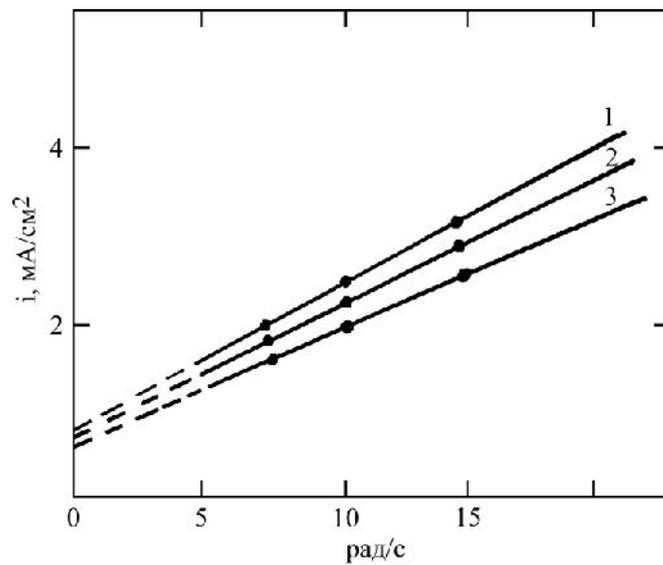
В 20%-м растворе NaCl при тех же значениях потенциалов наблюдаются токи, почти на порядок выше, чем в 48%-й  $H_2SO_4$  (рис. 3б). При этом активное растворение никеля начинается при более отрицательных потенциалах, чем в 48%-й  $H_2SO_4$ , а рения – практически при тех же. Активное растворение никеля начинается при тех же значениях потенциалов, что и у сплавов, при этом, как и в 48%-й  $H_2SO_4$ , выделены области активного растворения, активно-пассивного перехода, пассивная и



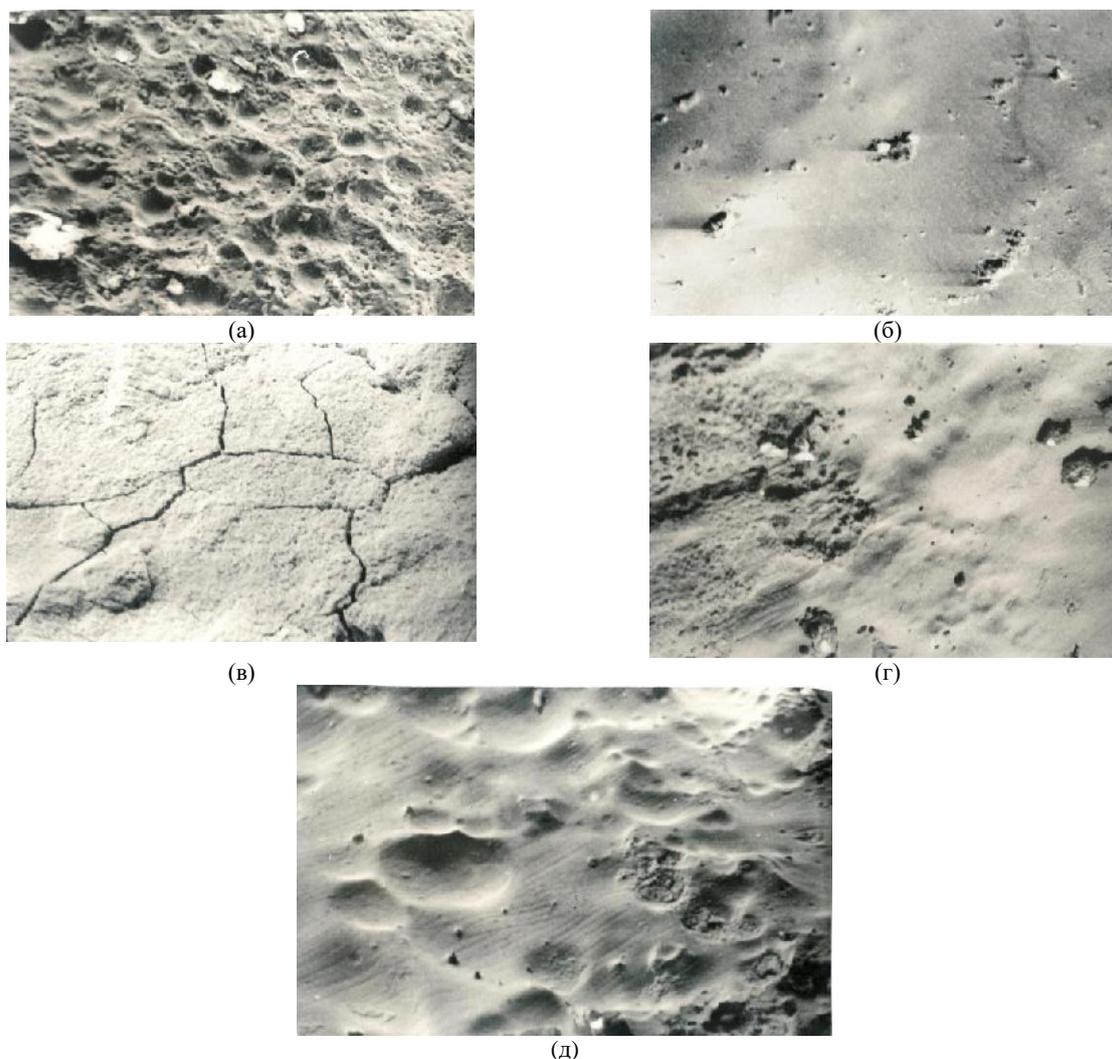
**Рис. 8.** Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения сплава Ni-10Re-0,4Zr в 150 г/л NaCl: (а) – при частоте вращения электрода, об/мин: 1 – 0; 2 – 500; 3 – 1000; 4 – 2000; (б) – при частоте вращения электрода 2000 об/мин и концентрации NaCl, г/л: 1 – 100; 2 – 150; 3 – 200.



**Рис. 9.** Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения сплава Ni-10Re-0,25Zr-0,2Pd в 100 г/л NaCl: (а) – при частоте вращения электрода, об/мин: 1 – 0; 2 – 500; 3 – 1000; 4 – 2000; 5 – 4000; (б) – при частоте вращения электрода 1000 об/мин и концентрации NaCl, г/л: 1 – 50; 2 – 150; 3 – 200.



**Рис. 10.** Влияние частоты вращения дискового электрода из сплава Ni-10Re-0,4Zr на предельный ток в NaCl, г/л: 1 – 100; 2 – 150; 3 – 200.



**Рис. 11.** Морфология поверхности сплава Ni-10Re-0,4Zr, анодно-поляризованного в 150 г/л NaCl при  $n = 1000$  об/мин при потенциалах, отмеченных на кривой 3 рис. 8а ( $\times 400$ ).

транспассивная. При токах  $\sim 200$  мА/см<sup>2</sup> анодные поляризационные кривые сплавов Ni-10Re, Ni-20Re-0,4Zr и Ni-10Re-0,2Hf сдвигаются положительнее кривой никеля, а после  $\sim 700$  мА/см<sup>2</sup> наблюдается влияние состава сплава – введение в сплавы циркония или гафния сдвигает активное растворение к более положительным потенциалам. При указанных плотностях тока и значениях потенциалов пассивационные ограничения, как и на никеле, почти не проявляются, они заметны только у сплава Ni-10Re-3W-0,1Hf (кривая 8). В раствор переходит только никель. Визуальные наблюдения показывают, что на поверхности сплавов при анодном растворении в NaCl формируются пленки более рыхлые и менее прочные, чем в 48%-й H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Поляризационные кривые анодного растворения сплавов Ni-10Re и Ni-10Re-0,2Hf, приведенные на рис. 6, показывают, что деформирование сплавов приводит к растворению их при более отрицательных потенциалах, чем отожженных и в 48%-й H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, и в 20%-м NaCl.

Из исследований, проведенных на вращающемся дисковом электроде (рис. 7), видно, что у сплавов, как и у никеля, на поляризационных кривых наблюдаются характерные области, соответствующие активному растворению (I), предельному току (II) и транспассивному растворению (III). При этом введение в сплав Ni-10Re 0,4% Zr приводит к сдвигу активного растворения по сравнению со сплавом Ni-10Re несколько положительнее, уменьшая предельные токи, но сдвигает транспассивную область к более отрицательным значениям потенциала. Видно, что предельные токи сплавов меньше, чем наблюдаемые у никеля. Совместное введение в сплав Zr и Pd сдвигает активную область растворения к более положительным значениям потенциалов, а транспассивная область расположена еще положительнее, чем у никеля. Анодное растворение (вне зависимости от концентрации соли и частоты вращения электрода) начинается при потенциале, близком к 1,0 В.

При больших концентрациях соли (50–100 г/л) и особенно при 150–200 г/л

решающее значение приобретает отвод продуктов реакции от поверхности анода. Если скорость отвода недостаточна, то на поверхности в области предельного тока образуется солевая пленка, ограничивающая скорость растворения металла. Так, в области активного растворения поверхность никеля серая, травленная, в то время как при диффузионных ограничениях и в транспассивной области кристаллографическая неоднородность поликристаллического металла не проявляется и поверхность под пленкой блестящая, полированная. При концентрации соли более 150 г/л в области предельного тока могут проявляться отдельные питтинги.

Поведение сплавов в этих условиях аналогично поведению никеля (рис. 8, 9). Величина предельного тока заметно растет с увеличением частоты вращения дискового электрода и в меньшей степени падает с повышением концентрации NaCl. Наблюдается линейная зависимость между предельным током и концентрацией соли и корнем квадратным из частоты вращения электрода, хотя кривые и не экстраполируются на начало координат (рис. 10). В области активного растворения сплавов в анолите практически обнаруживается только  $Ni^{2+}$ .

Морфология поверхности сплава Ni-10Re-0,4Zr на различных участках поляризационной кривой, согласно с обозначениями на рис. 8а, представлена на рис. 11. На участке активного растворения при потенциале  $\varphi \sim 550$  мВ прежде всего растворяется никель (его ионы обнаруживаются в растворе), поверхность вся изъязвлена питтингами (рис. 11а).

Около пика активно-пассивного перехода уже накапливается пленка – она уплотняется, что приводит впоследствии к падению тока (рис. 11б). В области предельного тока (рис. 11в) вся поверхность покрыта достаточно плотной и толстой пленкой с сеткой трещин. На рентгенограммах наблюдаются четкие рефлексы соединений  $NiCl_2 \cdot 4H_2O$  и  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  и очень слабые рефлексы  $Re_2O_3 \cdot xH_2O$ . Одновременно отмечены некоторые другие рефлексы, идентифицировать которые не удалось. В области, близкой к началу транспассивного растворения (рис. 11г), пленка перестраивается, на ней появляются отдельные питтинги, которые еще более развиваются в области транспассивного растворения (рис. 11д). Рентгеноструктурный анализ пленки, сформированной в этой области, не проводился.

## ВЫВОДЫ

1. Выявлено влияние легирующих компонентов, состава и концентрации коррозионной среды на коррозионную стойкость сплавов системы Ni-Re.

2. Показано, что совместное легирование никеля рением, цирконием и палладием существенно увеличивает коррозионную стойкость сплавов по сравнению с Ni-Re во всех изученных средах, приводя к упрочнению твердого раствора за счет дополнительного искажения кристаллической решетки никеля.

3. Рентгенофазовым анализом установлено, что коррозия Ni-Re сплавов в концентрированных HCl, HNO<sub>3</sub> и царской водке идет с избирательным растворением никеля, особенно в последней. В поверхностном слое появляются аморфные фазы, а также гидроксилхлорид  $Ni_2Cl(OH)_3$ , гидроксидгидрат  $3Ni(OH)_2 \cdot 2H_2O$ , гидроксид  $Ni(OH)_2$  или оксид  $Ni_2O_3$ . В поверхностном слое зафиксировано наличие хлора  $0,25 \pm 0,1$  и  $2,3 \pm 0,2$  вес.% при травлении в соляной кислоте и царской водке соответственно.

4. Показано, что отжиг деформированных сплавов приводит к замедлению их растворения в 48%-й H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 20%-м NaCl.

5. Установлено, что легирование сплавов Ni-Re цирконием и палладием, не меняя характера растворения, сдвигает область активного и транспассивного растворения в сторону более положительных потенциалов и уменьшает значения предельного тока.

6. Предельный ток на потенциодинамических зависимостях сплавов Ni-Re, легированных цирконием, гафнием, палладием, в растворе NaCl, как и у никеля, имеет диффузионно-миграционную природу, уменьшаясь с ростом концентрации соли и увеличиваясь с ростом частоты вращения дискового электрода.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность Е.П. Арской за предоставленные образцы сплавов.

Авторы выражают благодарность Л. Дерменжи за определение химического состава сплавов.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рений в новой технике. Труды III Всесоюзного совещания по проблемам рения, ч. 2, М., 1970.
2. Физико-химические свойства сплавов рения, М.: Наука, 1979. 215 с.
3. Савицкий, Е.М., Бурханов, Г.С., Редкие металлы и сплавы. Физико-химический анализ и металловедение, М.: Наука, 1980, с. 179-180.
4. Физико-химия сплавов редких металлов, М.: Наука, 1981, с. 197.

5. *Исследование и применение сплавов тугоплавких металлов*, М., 1983.
6. Томашов, Н.Д., Матвеева, Г.В., Коррозионные и электрохимические свойства рения, *Рений в новой технике*, ч. 2, М.: Наука, 1970. с. 150.
7. Коровин, Ю.М., Улановский, И.Б., Некоторые коррозионные характеристики рения, молибдена, вольфрама, ниобия и их сплавов в морской воде, *Защита металлов*, 1974, т. 10, № 2, с. 167.
8. Паршутин, В.В., Андреева, Л.Н., Арская, Е.П., Коррозионное поведение сплавов Ni-10Re, Ni-10Re-Mo и Ni-Re-W-Hf, *Физико-химические свойства сплавов рения*, М.: Наука, 1979, с. 124.
9. Parshutin, V.V., Andreeva, L.N., Piskunova, N.V. and Volodina, G.F., Effect of the medium on corrosion and electrochemical behavior of nickel-rhenium alloys with the addition of molybdenum, tungsten and hafnium, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 1997, vol. 33, no. 4, p. 6.
10. Лавренко, В.А., Об анодном электролитическом окислении рения, *Журнал физической химии*, 1961, т. 35, № 1, с. 198.
11. Trifalat, S., Piolet, C. and Mofidi, Dj., Oxydation electrochimique du rhenium, du molybdene, du tungsten et de quelgne alliages de rhenium. Application analytique, *Bull. societe chim. de France*, 1968, no. 2, p. 844.
12. Bohni, H. and Uhlig, H.H., Effect of alloyed Re on the critical pitting potenait of 18%Cr/10%Ni stainless, *Corros. Sci.*, 1969, vol. 9, no. 5, p. 353.
13. Girandeaу, A. and Gross, M., Influence de certains cations alcalins sur la cinetique de dissolution anodique du rgenium, *Corros. Sci.*, 1974, vol. 14, no. 2, p. 151.
14. Паршутин, В.В., Исследование электрохимической обработки сплавов вольфрама и молибдена с рением, никелем и медью, *Материалы научно-технической конференции «Наука – производству»*, ч. 1, Новосибирск, 1974, с. 98.
15. Паршутин, В.В., Мочалова, Г.Л., Чубуков, В.Н., Тупаков, А.М., *Электрохимическая обработка тугоплавких материалов. Размерная ЭХО деталей машин*, ч. 1, Основы теории процесса, Тула, 1975, с. 39.
16. Паршутин, В.В., Мочалова, Г.Л., *Исследование анодного растворения вольфрама, молибдена и их сплавов с рением. Теория и практика электрохимической обработки материалов*, Кишинев: Штиинца, 1976, с. 64.
17. Дикусар, А.И., Мичукова, Н.Ю., Паршутин, В.В., Петров, Ю.И., Особенности анодного растворения рения в нейтральных растворах при высоких плотностях тока, *ДАН СССР*, 1977, т. 233, № 5, с. 900.
18. Паршутин, В.В., Мичукова, Н.Ю., Мочалова, Г.Л., Жданова, Л.Л., Влияние условий электрохимической обработки на морфологию поверхности рениевых сплавов, *Физико-химические свойства сплавов рения*, М.: Наука, 1979, с. 117.
19. Мичукова, Н.Ю., Дикусар, А.И., Паршутин, В.В., Особенности растворения сплавов ВР-27ВП и МР-47ВП в нейтральных и щелочных растворах, *Размерная электрохимическая обработка деталей машин «ЭХО-80»*, Тула, 1980, с. 114.
20. Петров, Ю.Н., Паршутин, В.В., Андреева, Л.Н., Исследование коррозионного поведения сплавов Ni-Re, легированных Mo, W и Hf, *Исследование и применение сплавов тугоплавких металлов*, М.: Наука, 1983, с. 139.
21. Петров, Ю.Н., Паршутин, В.В., Тылкина, М.А., Казанская, Н.А., Особенности высокоскоростного анодного растворения Co и его сплавов с Mo и Re, *Исследование и применение сплавов тугоплавких металлов*, М.: Наука, 1983, с. 156.
22. Comez, J., Gardiarabal, J.I., Schrebler, R., et al., Electrochemical behavior of rhenium in aqueous solution, *Electroanal. Chem.*, 1989, vol. 160, p. 113.
23. Паршутин, В.В., Электрохимическое и коррозионное поведение сплавов рения, *Коррозия и защита металлов*, Кишинев: Штиинца, 1992, с. 47.
24. Dikusar, A.I., Ivanenkov, I.A., Saushkin, B.P., Silkin, S.A., et al, High-speed anode dissolution of heat-resistant chrome–nickel alloys containing tungsten and rhenium: I. Chloride solutions, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 43, no. 1, p. 1.
25. Dikusar, A.I., Ivanenkov, I.A., Saushkin, B.P., Silkin, S.A., et al., High-speed anode dissolution of heat-resistant chrome–nickel alloys containing tungsten and rhenium: II. Nitrate solutions, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 43, no. 3, p. 155.
26. Dikusar, A.I., Ivanenkov, I.A., Saushkin, B.P., Silkin S.A., et al., High-speed anode dissolution of heat-resistant chrome–nickel alloys containing tungsten and rhenium: III. Chloride–nitrate solutions, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 43, no. 4, p. 231.
27. Шалдаев, В.С., Малофеева, А.Н., Давыдов, А.Д., Определение скорости коррозии молибдена, рения и их сплавов в растворе хлорида натрия методом тафелевой экстраполяции, *Электрохимия*, 2014, т. 50, № 10, с. 1106.
28. Parshutin, V.V., Gerasimov, M.V. and Bogdashkina, N.L., Corrosion behavior of nickel–rhenium alloys in concentrated acids, *J. Surf. Investig.: X-ray, Synchrotron Neutr. Techniq.*, 2021, vol. 15, no. 5, p. 975.
29. Пишикин, А.М., Поперека, М.Я., Начальные и стационарные потенциалы электролитического рения и сплава рений–никель, *Защита металлов*, 1970, т. 6, № 5, с. 535.

30. Соминская, З.М., Артамонова, Е.К., Перлина, Т.В. и др., Поведение рения, молибдена, вольфрама и их сплавов при анодном растворении в щелочном электролите, *Рений. Химия, технология, анализ*, М.: Наука, 1976, с. 110.
31. Чернышова, О.В., Дробот, Д.В., Чернышов, В.И., Способ получения металлических порошков никеля и рения с различным соотношением компонентов при переработке ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов, Патент России № 2555317, 2015.07.10, Бюл. № 19/2015.
32. Каблов, Е.Н., Толораия, В.Н., Орехов, Н.Г., Монокристаллические никелевые рений содержащие сплавы для турбинных лопаток ГТД, *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2002, № 7, с. 7.
33. Петрушин, Н.В., Оспенникова, О.Г., Елютин, Е.С., Рений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газотурбинных двигателей, *Авиационные материалы и технологии*, 2014, № S5, с. 5.
34. Елисеев, Ю.С., Крымов, В.В., Митрофанов, А.А., и др. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей, М.: Дрофа, 2002.
35. Томашов, Н.Д., Чернова Г.П., *Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы*, М., 1993.
36. Баранов, С.А., Дикусар, А.И., Кинетика электрохимической нанонуклеации при индуцированном соосаждении металлов группы железа с тугоплавкими металлами (W, Mo, Re), *ЭОМ*, 2021, т. 57, № 5, с. 1.

#### Summary

The comparative corrosion resistance and electrochemical behavior in acidic, alkaline, and neutral media of both pure metals and the Ni-Re alloys doped with zirconium, hafnium, tungsten, and palladium were investigated. A positive effect of zirconium on the corrosion resistance of the Ni-Re alloy in all studied media was demonstrated. It is shown that the Ni-Re alloy doped with hafnium also improves corrosion resistance and compensates its reduction at the introduction to a tungsten alloy. It is shown that the Ni-Re alloy doped with zirconium together with palladium has the maximum corrosion resistance.

*Keywords:* corrosion resistance, nickel-rhenium alloys, zirconium, hafnium, tungsten, palladium, tests in aggressive media