

Н. А. Амирханова, В. Э. Галиев, С. В. Устюжанина

## ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РАСТВОРЕНИЯ ЖЕЛЕЗОХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ХН35ВТЮ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Сплав на железоникелевой основе ХН35ВТЮ является перспективным материалом в производстве рабочих лопаток газотурбинных и других двигателей, компрессорных лопаток [1]. Обработка деталей высокой точности и сложной конфигурации из данного сплава механическими методами затруднена. В качестве альтернативного метода обработки предлагается электрохимическая обработка. Исследовалась электрохимическая обрабатываемость сплава ХН35ВТЮ на железоникелевой основе. При разработке технологического процесса необходимо подобрать электролит, обеспечивающий высокую производительность, качество и точность обработки. Для этого исследовалась электрохимическая обрабатываемость в электролитах разной природы (8 %, 10 %, 15 %  $\text{NaNO}_3$ , в комбинированных электролитах на основе 8 %  $\text{NaNO}_3$  с добавками 1 %, 2 %, 3 % и 5 %  $\text{NaCl}$ ). *Электрохимическая обработка; сплав ХН35ВТЮ; электролит; потенциостатические поляризационные кривые; выходные параметры ЭХО: производительность, выход по току, коэффициент избирательности, высота микронеровностей*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время весьма перспективным для изготовления компрессорных лопаток, рабочих лопаток газотурбинных и других двигателей нового поколения является сплав, содержащий в качестве основы железо, никель и хром. Состав сплава приведен в табл. 1 [1].

Обработка данного сплава резанием и другими традиционными методами затруднена. В связи с этим в технологии машиностроения наряду с электрофизическими методами обработки материалов находит применение электрохимическая обработка (ЭХО), как одна из наиболее перспективных.

Для достижения высокой производительности метода ЭХО анодное растворение осуществляют при очень высоких значениях плотности тока. Природа материала, структура его, природа и концентрация электролита, режим обработки в значительной мере сказываются на выходных характеристиках процесса: производительности, точности, качестве. Поэтому при разработке технологического процесса электрохимической обработки должно быть уделено особое внимание выбору электролита. При электрохимической обработке необходимо использовать электролиты, способствующие высокому съему материала анода, обеспечивающие локальность процесса растворения [2]. Электрохимические характеристики обрабатываемости данного сплава ранее не изучались.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Проводились поляризационные исследования на вращающемся дисковом электроде, на потенциостате ПИ-50-1. Скорость развертки составляла 3,2 В/мин. На модельной установке, имитирующей электрохимический процесс, проводилась обработка образцов при межэлектродном промежутке 0,1 мм и 0,15 мм. Данная установка представляет собой ячейку из органического стекла. Образцы представляли собой цилиндрические прутки диаметром 6 мм. Зазор между катодом и анодом устанавливался при помощи часового механизма. Образцы взвешивались до и после эксперимента. После электрохимической обработки при напряжении 12 В в однокомпонентных и составных электролитах определялись линейная скорость съема, выход по току, изучалась микроструктура с помощью металлографического микроскопа МИИ-4У4.2 при увеличении  $\times 500$ , с помощью профилметра определялась высота микронеровностей.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что наиболее полную картину высокоскоростного растворения сплава можно получить, сопоставляя потенциодинамические поляризационные кривые, полученные в различных электролитах при использовании вращающегося дискового электрода. Исходя из известных литературных данных, была выбрана серия электролитов [3].

Таблица 1

## Состав сплава ХН35ВТЮ, %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Fe	B	W	Ti	Al	Cu
≤0,08	≤0,60	≤0,60	≤0,020	≤0,030	14,0-16,0	33-37,0	основа	≤0,020	2,80-3,50	2,40-3,20	0,70-1,40	≤0,30

При рассмотрении рисунков, гистограмм следует сослаться на табл. 2, где представлена нумерация электролитов, в которых изучались выходные параметры ЭХО: скорость съема, выход по току, коэффициент локализации, высота микронеровностей.

Таблица 2

## Нумерация электролитов, используемая на гистограммах

Номер электролита	Электролит
1	15%NaCl
2	8%NaNO <sub>3</sub>
3	10%NaNO <sub>3</sub>
4	15%NaNO <sub>3</sub>
5	8%NaNO <sub>3</sub> +1%NaCl
6	8%NaNO <sub>3</sub> +2%NaCl
7	8%NaNO <sub>3</sub> +3%NaCl
8	8%NaNO <sub>3</sub> +5%NaCl

На рис. 1, 2 и 3 приведены потенциодинамические поляризационные кривые для сплава ХН35ВТЮ в электролитах на основе нитрата натрия и хлорида натрия и в комбинированных электролитах. Как видно из рис. 1, ход поляризационной кривой весьма зависит от природы электролита. При анодной поляризации в растворе 15 % NaCl происходит активная ионизация сплава, начиная с 0,7 В и при сдвиге потенциала в область положительных значений наблюдается линейный подъем плотности поляризующего тока с увеличением потенциала. При этом наблюдается выделение хлора. Ход потенциодинамической кривой, полученной в растворе нитрата натрия с концентрацией от 8 % до 15 % характеризуется резким отличием от поляризации в 15 % NaCl. Анодно-анионная активация сплава начинается при весьма положительных электродных потенциалах (в пределах 1,8 В), что свидетельствует о том, что при переходе из катодной области в анодную происходит пассивация сплава. В области анодно-анионной активации выявлено, что при потенциалах в пределах 2,5 В наблюдается повышение плотности анодного тока с повышением концентрации нитрата натрия.

Для увеличения скорости съема железохромоникелевого сплава изучались поляризационные зависимости в комбинированных электро-

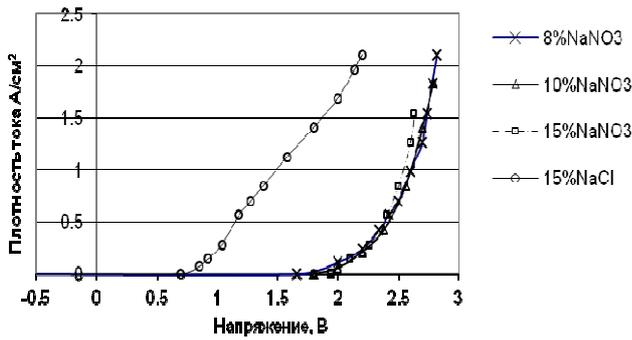
литах на основе 15 % NaNO<sub>3</sub> с добавкой 1 %, 2 % и 3 % NaCl (рис. 2). Как видно из рис. 2, добавление NaCl способствует сдвигу потенциала начала анодно-анионной активации в область более отрицательных значений и подъем плотности тока для комбинированных электролитов наблюдается при более отрицательных значениях потенциала.

При плотности тока  $i=1,27 \text{ A/cm}^2$  потенциал в области анодно-анионной активации наиболее положителен в растворе 15 % NaNO<sub>3</sub> и составляет 2,6 В, в 15%NaNO<sub>3</sub> + 1%NaCl 2,5 В, в 15%NaNO<sub>3</sub> + 2%NaCl 2,44В, в 15%NaNO<sub>3</sub>+ + 3%NaCl 2,4В. Выявлено, что добавка хлорида натрия в комбинированных электролит способствует понижению поляризации на электроде.

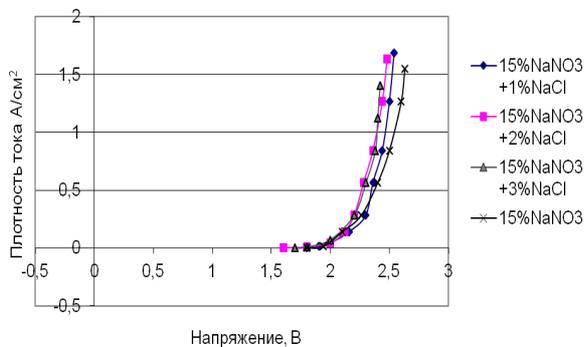
Подобные закономерности сдвига потенциала в область отрицательных значений при добавлении хлорида натрия выявлена, если концентрация нитрата натрия составляет 8 % (рис. 3). Показано, что в растворе хлорида натрия ионизация происходит в активной области, а в электролитах на основе нитрата натрия ионизация наблюдается в области анодно-нионной активации. При этом добавка хлорида натрия способствует снижению поляризации электрода.

На установке, имитирующей процесс ЭХО, где обеспечивался зазор 0,1 мм и 0,15 мм прокачивался электролит со скоростью 7,5 л/мин. Изучалось влияние природы электролита на производительность процесса (скорость съема, выход по току), на точность обработки и качество поверхности.

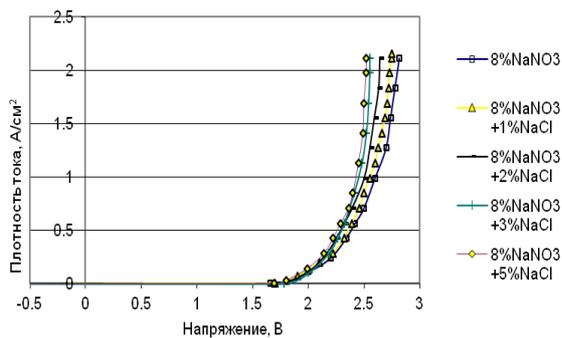
Как видно из рис. 4, природа электролита сказывается на производительности процесса. Наибольшая скорость съема достигается в 15%NaCl (электропроводность электролита  $\gamma = 0,1712 \text{ См/см}$ ), наименьшая скорость – в растворе 8 % NaNO<sub>3</sub> ( $\gamma = 0,06667 \text{ См/см}$ ) [4]. Наблюдается известная закономерность: с уменьшением концентрации и удельной электропроводности скорость съема уменьшается от 0,5 мм/мин в растворе 15 % NaNO<sub>3</sub> до 0,31 мм/мин в 8 % NaNO<sub>3</sub>. С повышением добавки хлорида натрия наблюдается повышение скорости съема от 0,31 мм/мин до 0,52 мм/мин.



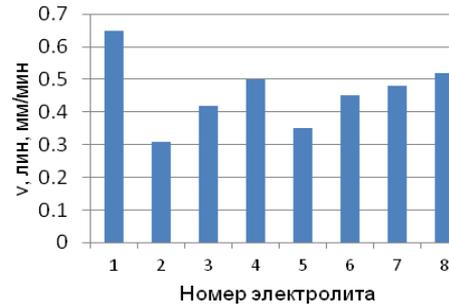
**Рис. 1.** Потенциодинамические поляризационные кривые сплава ХН35ВТЮ на вращающемся дисковом электроде ( $v = 1000$  об/мин) в электролитах на основе 8, 10, 15 %  $\text{NaNO}_3$  и в 15 %  $\text{NaCl}$



**Рис. 2.** Потенциодинамические поляризационные кривые сплава ХН35ВТЮ на вращающемся дисковом электроде ( $v = 1000$  об/мин) в электролитах на основе 15 %  $\text{NaNO}_3$  с добавками 1, 2 и 3 %  $\text{NaCl}$

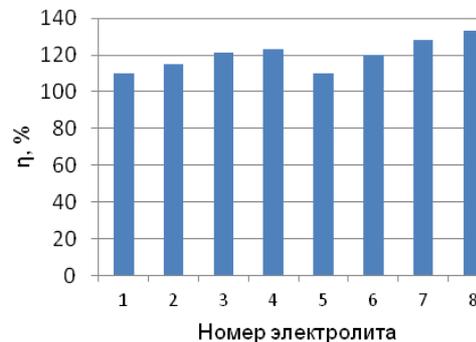


**Рис. 3.** Потенциодинамические поляризационные кривые сплава ХН35ВТЮ на вращающемся дисковом электроде ( $v = 1000$  об/мин) в электролитах на основе 8 %  $\text{NaNO}_3$  с добавками 1, 2, 3 и 5 %  $\text{NaCl}$



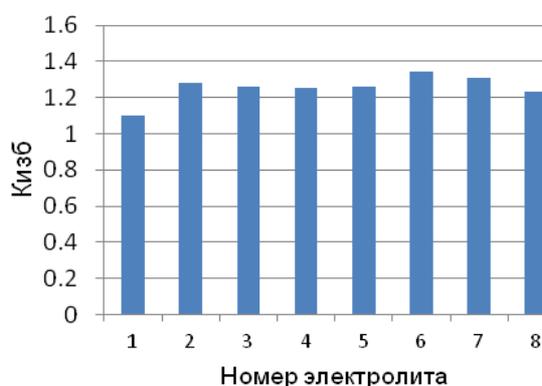
**Рис. 4.** Зависимость скорости съема от природы электролита при ЭХО сплава ХН35ВТЮ

Рассмотрим влияние природы электролита на выход по току (рис. 5). Для определения выхода по току рассчитывался электрохимический эквивалент сплава. В растворе хлориде натрия хром преимущественно поляризуется в 3-валентной форме, а при поляризации в электролитах на основе нитрата натрия хром переходит в виде хромат ионов, что учитывается при расчете электрохимического эквивалента сплава. Как видно из рис. 3, наибольший выход по току достигается в растворе 8 %  $\text{NaNO}_3$  + 5 %  $\text{NaCl}$  (133 %). Значение выхода по току выше 100 % свидетельствует о том, что наряду с равномерной ионизацией в электролите происходит дезинтеграция интерметаллидных фаз –  $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$  [5]. В растворах нитрата натрия выход по току практически соизмерим. С введением добавки хлорида натрия наблюдается заметное повышение выхода по току, то есть введение хлорида в виде добавки к основе нитрата снижает не только поляризацию, но и способствует переходу компонентов сплава в раствор. Производительность процесса (скорость съема, выход по току) закономерно возрастает при увеличении добавки нитрата хлора к основе нитрата натрия (рис. 4, 5).



**Рис. 5.** Зависимость выхода по току от природы электролита при ЭХО сплава ХН35ВТЮ

Для суждения о точности обработки по известной методике [3] измеряли коэффициенты избирательности, для расчета которой определялась скорость съема при зазоре 0,1 мм и при 0,15 мм. На рис. 6 представлены значения коэффициентов избирательности в электролитах разной природы. Известно, что чем выше коэффициент избирательности, тем более высокую точность можно обеспечить при ЭХО. Как видно из рис. 6, наибольшее значение коэффициента избирательности, то есть наиболее высокую точность можно получить при ЭХО в комбинированном электролите 8 %  $\text{NaNO}_3$  + 2 %  $\text{NaCl}$ .

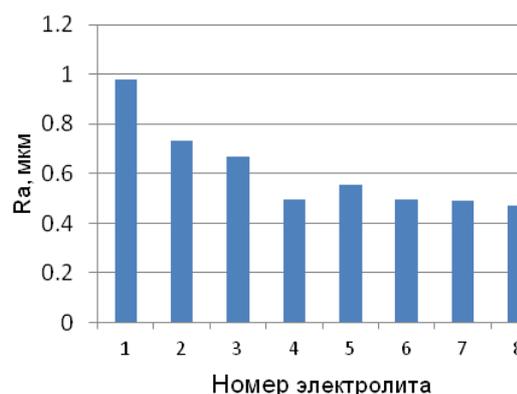


**Рис. 6.** Зависимость коэффициента избирательности от природы электролита при ЭХО сплава ХН35ВТЮ

В тех случаях, когда электрохимическая обработка является финишной операцией, весьма большое значение имеет качество поверхности. На рис. 7 представлена гистограмма высот микронеровностей в электролитах различной природы. Как видно из рис. 7, наименьшая высота микронеровностей наблюдается при ЭХО в комбинированном растворе 8 %  $\text{NaNO}_3$  + 3 %  $\text{NaCl}$ . Добавка 3 %  $\text{NaCl}$  весьма благоприятно сказывается на качестве поверхности, так как высота микронеровностей при ЭХО в 1,5 раза меньше, чем в чистом растворе 8%  $\text{NaNO}_3$ .

В качестве подтверждения можно оценить микроструктуры поверхностей после ЭХО в электролитах различной природы на фотографиях, представленных на рис. 8. Как видно из рисунка, после обработки в растворе нитрата натрия сплав покрывается темной пленкой, при добавлении хлорида натрия (1, 2, 3 и 5 %) толщина пленки становится меньше. Наиболее рав-

номерная светлая поверхность получается в комбинированном электролите 8 %  $\text{NaNO}_3$  + 3 %  $\text{NaCl}$ . Выявлено, что после поляризации сплава в 15 %  $\text{NaCl}$  пленка отсутствует, но наблюдаются питтинги, неравномерно распределенные по поверхности, где шероховатость достигает 1,5 мкм.



**Рис. 7.** Зависимость высоты микронеровностей от природы электролита при ЭХО сплава ХН35ВТЮ

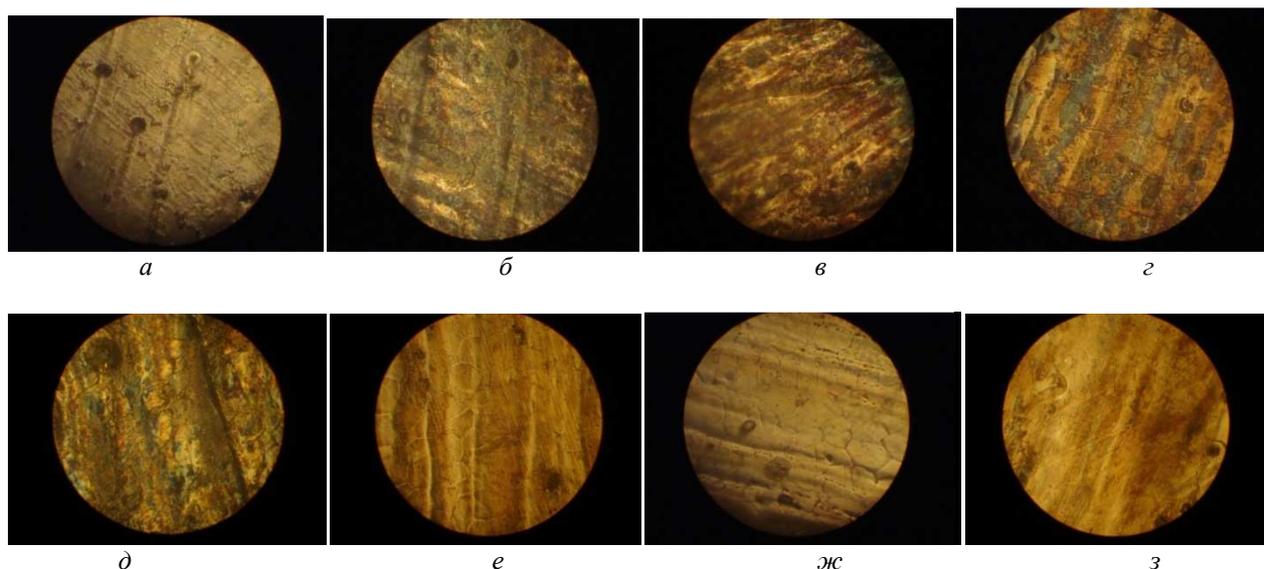
Наименьшая высота микронеровностей достигается при ЭХО в комбинированном электролите 8%  $\text{NaNO}_3$ +3%  $\text{NaCl}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В совокупности рассматривая полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. В растворе на основе хлорида натрия процесс поляризации происходит в активной области, а в растворах на основе нитрата натрия и в комбинированных электролитах – в области анодно-анионной активации.

2. Скорость съема достигает наибольших значений при ЭХО в растворе 15 %  $\text{NaCl}$  и в комбинированных электролитах, что, возможно, обусловлено близкими величинами электропроводности растворов. Выход по току после ЭХО в растворах на основе 8 %  $\text{NaNO}_3$  с добавками 3 и 5 %  $\text{NaCl}$  имеет наибольшее значение. В значительной мере влияние природы электролита оказывает на качество поверхности.



**Рис. 8.** Микроструктуры сплава ХН35ВТЮ при увеличении в 500 раз после ЭХО в различных электролитах: *a* – 15 % NaCl, *б* – 8 % NaNO<sub>3</sub>; *в* – 10 % NaNO<sub>3</sub>; *г* – 15 % NaNO<sub>3</sub>; *д* – 8 % NaNO<sub>3</sub> + 1 % NaCl; *е* – 8 % NaNO<sub>3</sub> + 2 % NaCl; *ж* – 8 % NaNO<sub>3</sub> + 3 % NaCl; *з* – 8 % NaNO<sub>3</sub> + 5 % NaCl

3. На основе комплекса проведенных исследований электрохимической обработки железохромоникелевого сплава ХН35ВТЮ рекомендуется использовать комбинированный электролит 8 % NaNO<sub>3</sub> + 3 % NaCl, где скорость съема составляет  $v = 0,48$  мм/мин, выход по току  $\eta = 128$  %, коэффициент избирательности  $K_{изб} = 1,31$ , высота микронеровностей  $Ra = 0,491$  мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марочник сталей и сплавов / М. М. Колосков [и др.]. М.: Машиностроение, 2004. 672 с.
2. **Амирханова Н. А., Зайцев А. Н., Зарипов Р. А.** Электрохимическая размерная обработка материалов в машиностроении: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2004. 258 с.
3. Особенности высокоскоростного анодного растворения никельхромовых сплавов / Н. А. Амирханова [и др.]. Уфа: Гилем, 2002. 200 с.
4. Свойства электролитов: справочн. издание / И. Н. Максимова [и др.]. М.: Металлургия, 1987. 128 с.
5. **Мальцев М. В.** Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970. 364 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Амирханова Наиля Анваровна**, проф. каф. общей химии, засл. деятель науки РФ. Дипл. химик (КГУ, 1962). Д-р техн. наук по технологии электрохим. производств (М., ВИАМ, 1985) Иссл. в обл. электрохим. обработки.

**Галиев Владимир Энгелевич**, доц. каф. технологии машиностроения, гл. технолог ОАО ИНТЦ «Искра». Дипл. инженер-механик (УАИ, 1985). Канд. техн. наук (МГТУ им. Баумана, 1990). Иссл. в обл. технологии и оборудования электрофиз.-хим. методов обработки.

**Устюжанина Светлана Владимировна**, асп. каф. общей химии. Дипл. инженер по машинам и технологиям высокоэффективных процессов обработки (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. электрохим. обработки никельхромовых сплавов