ХИМИЯ

УДК 544.653.22

https://doi.org/ 10.47928/1726-9946-2026-26-1-42-55

QMBQYW

Научная статья

Химическое и электрохимическое растворение твердосплавной матрицы отработанного алмазного инструмента в расплаве гидроксида натрия

Х. Б. Кушхов[1] – действительный член АМАН, М. Н. Лигидова[2], А. М. Потапов[3], М. А. Шогенова[4], Г. А. Нурнепесова[5]

[1,2,4,5] *Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия*
[3] *Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*
[1] *hasbikushchov@yahoo.com*, [2] *adamokova1@mail.ru*, [3] *a.potapov_ 50@mail.ru*,
[4] *madina.tlimakhova@mail.ru*, [5] *g.nurnepesova@icloud.com*

Аннотация. Работа посвящена вопросам переработки компонентов матрицы отработанного алмазного инструмента (вольфрама, кобальта, никеля, меди). Методом термодинамического анализа проведено теоретическое обоснование наиболее вероятных реакций взаимодействия между компонентами матрицы алмазного инструмента и расплавом гидроксида натрия в инертной и воздушной атмосферах. Методами химического и электрохимического растворения показана возможность извлечения компонентов матрицы отработанного алмазного инструмента. Проведено сравнение скоростей химического и электрохимического растворения компонентов матрицы отработанного алмазного инструмента и скорости коррозии стали СТ-3 в расплаве гидроксида натрия.

Ключевые слова: отработанный алмазный инструмент, термодинамическая оценка взаимодействий, электрохимическое растворение, расплав гидроксида натрия, карбид вольфрама, вольфрамат натрия.

Финансирование. Работа не выполнялась в рамках фондов.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Для цитирования. *Кушхов Х. Б., Лигидова М. Н., Потапов А. М., Шогенова М. А., Нурнепесова Г. А.* Химическое и электрохимическое растворение твердосплавной матрицы отработанного алмазного инструмента в расплаве гидроксида натрия // Доклады АМАН. 2026. Т. 26, № 1. С. 42–55. DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2026-26-1-42-55; EDN: QMBQYW

© Кушхов Х. Б., Лигидова М. Н., Потапов А. М., Шогенова М. А., Нурнепесова Г. А., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CHEMISTRY

UDC 544.653.22 Original article

Chemical and electrochemical dissolution of the hard-alloy matrix of scrapped diamond tools in molten sodium hydroxide

Khasbi B. Kushkhov[1] – full member of IAAS, Marina N. Ligidova[2], Aleksei M. Potapov[3], Madina A. Shogenova[4], Gultach A. Nurnepesova[5]

[1] *Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia*
[2] *Institute of High Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*
[1] *hasbikushchov@yahoo.com,* [2] *adamokova1@mail.ru,* [3] *a.potapov_ 50@mail.ru,*
[4] *madina.tlimakhova@mail.ru,* [5] *g.nurnepesova@icloud.com*

Abstract. The paper is devoted to issues of processing matrix components of scrapped diamond tools (tungsten, cobalt, and nickel, copper). Using the method of thermodynamic analysis, a theoretical justification of the most probable reactions between the components of the diamond tool matrix and molten sodium hydroxide in inert and air atmospheres was carried out. The possibility of extracting components of the scrapped diamond tool matrix was demonstrated using chemical and electrochemical dissolution methods. A comparison was made of the rates of chemical and electrochemical dissolution of the components of the spent diamond tool matrix and the corrosion rate of ST-3 steel in molten sodium hydroxide.

Keywords: scrapped diamond tool, thermodynamic assessment of interactions, electrochemical dissolution, molten sodium hydroxide, tungsten carbide, sodium tungstate.

Funding. The work was not carried out within the framework of funds.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print.

For citation. *Kushkhov H. B., Ligidova M. N., Potapov A. M., Shogenova M. A., Nurnepesova G. A.* Chemical and electrochemical dissolution of the hard-alloy matrix of scrapped diamond tools in molten sodium hydroxide. Adyghe Int. Sci. J. 2026. Vol. 26, No. 1. Pp. 42–55.
DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2026-26-1-42-55; EDN: QMBQYW

© Kushkhov H. B., Ligidova M. N., Potapov A. M., Shogenova M. A., Nurnepesova G. A., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение.

Отработанный алмазный инструмент является источником природных и технических алмазов, а также вольфрама, кобальта, меди и никеля. К настоящему времени в РФ и за рубежом хорошо разработаны методы разложения кусковых вольфрам-кобальтовых твердых сплавов: окислительный обжиг, сплавление с цинком [1]–[11].

В технологии более сложных композитов, используемых, в частности, при изготовлении алмазного инструмента эти методы по различным причинам не могут быть применены и практикуется кислотное, химическое или электрохимическое разложение твердосплавной матрицы, сопровождающиеся значительными выбросами оксидов азота и фтороводорода. При этом извлекаются лишь алмазы, а вольфрам и другие ценные компоненты остаются в отходах и их переработка представляет самостоятельную проблему. Соответственно, не трудно представить меру экологических последствий и объемы потерь дорогостоящих и дефицитных компонентов твердых сплавов. Решение этой проблемы имеет важное значение.

Методы выделения компонентов твердых сплавов из отработанного алмазного инструмента существенно отличается друг от друга не только режимом обработки, но и природой приемлемых химических реактивов. Отработанный буровой и режущий инструмент, твердосплавная матрица которого содержит алмазы, вольфрам, кобальт, никель, медь. Извлечение алмазов требует создания таких условий, при которых происходит интенсивное окисление основного компонента матрицы карбида вольфрама, но, не разрушая сами алмазы. Метод термохимического разрушения твердосплавных вставок не может быть применен, так как требует рабочей температуры не менее 1173 K, а алмазы начинают окисляться на воздухе уже при 973 K. Высокотемпературные расплавы окислители карбонаты, сульфаты, хроматы для этих целей также не пригодны, т.к. они окисляют не только компоненты твердого сплава алмазного инструмента, но и сами алмазы. При температурах плавления этих соединений (выше 1173 K) могут также происходить графитизация алмазов.

Наиболее подходящим реагентом для рекуперации отработанного алмазного инструмента могут быть низкотемпературные расплавы на основе гидроксидов щелочных и щелочноземельных металлов.

Для выяснения возможности рекуперации отработанного алмазного инструмента первоначально нами была проведена термодинамическая оценка взаимодействия твердосплавной матрицы с гидроксидом натрия.

Методы расчета.

Термодинамическая оценка взаимодействия твердосплавной матрицы алмазного инструмента с гидроксидом натрия при температурах 600–800 K.

Для проведения термодинамической оценки реакций взаимодействия твердосплавной матрицы с гидроксидом натрия нами было выполнено термодинамическое моделирование с использованием программного комплекса HSC-9.9 [12] и встроенной в него базы термодинамических данных веществ.

В Таблице 1 приведены возможные реакции взаимодействия расплавов гидроксида натрия с компонентами твердосплавной матрицы алмазного инструмента (карбидом вольфрама, металлическим никелем, кобальтом, медью).

Рассчитанные значения G реакции (таблица 1, реакции 1–3) свидетельствуют о том, что реакции взаимодействия карбида вольфрама с расплавом гидроксида натрия в атмосфере аргона с выделением водорода термодинамической точки зрения невозможны. Однако в присутствии кислорода в воздушной атмосфере возможно взаимодействие рас-

плава NaOH с компонентами твердосплавной матрицы алмазного инструмента (карбидом вольфрама, металлическим никелем, кобальтом, медью) с образованием вольфраматов, карбонатов, оксидов углерода, никеля, кобальта, меди и воды.

Взаимодействия протекают необратимо в сторону продуктов (Таблица 1, реакции 4–11, 13, 16).

Таблица 1. Температурная зависимость стандартной свободной энергии реакции взаимодействия (ΔG) твердосплавной матрицы алмазного инструмента с расплавом гидроксида натрия

Table 1. Temperature dependence of the standard free energy of the reaction of interaction (ΔG) of the carbide matrix of a diamond tool with a sodium hydroxide melt

№	Химические реакции взаимодействия	Значение ΔG, кДж/моль		
		600 K	700 K	800 K
1	$WC + 10\,NaOH(l) \longrightarrow Na_2WO_4(l) + Na_2CO_3(l) + 3\,Na_2O(l) + 5\,H_2$	213,4	174,3	135,6
2	$WC + 6\,NaOH(l) \longrightarrow WO_2 + CO + 3\,Na_2O(l) + 3\,H_2$	483,0	445,8	409,3
3	$WC + 10\,NaOH(l) \longrightarrow WO_3 + CO_2 + 5\,Na_2O(l) + 5\,H_2$	805,6	752,7	700,6
4	$WC + \frac{3}{2}\,O_2 + 2\,NaOH \longrightarrow Na_2O + WO_2 + CO + H_2O$	-457,0	-458,4	-459,6
5	$WC + 2\,O_2 + 2\,NaOH(l) \longrightarrow Na_2O(l) + WO_2 + CO_2 + H_2O$	-687,6	-680,2	-672,6
6	$WC + 2{,}5\,O_2(g) + 2\,NaOH(l) \longrightarrow Na_2O(l) + WO_3(l) + CO_2(g) + H_2O(g)$	-860,3	-846,9	-833,8
7	$WC + 2\,O_2 + 2\,NaOH \longrightarrow WO_2 + Na_2CO_3 + H_2O$	-938,6	-914,9	-891,5
8	$WC + 2\,O_2 + 2\,NaOH \longrightarrow Na_2WO_4 + CO + H_2O$	-970,9	-968,9	-966,8
9	$WC + \frac{3}{2}\,O_2 + 4\,NaOH(l) \longrightarrow Na_2WO_4(l) + Na_2CO_3(l) + 2\,H_2O$	-1259,1	-1226,2	-1195,7
10	$2\,Ni + 2\,NaOH + O_2 \longrightarrow 2\,NiO + Na_2O + H_2O$	-218,7	-211,0	-203,0
11	$Ni + 2\,NaOH \longrightarrow NiO + Na_2O + H_2$	179,1	172,8	166,6
12	$Co + NaOH(l) + 0{,}5\,O_2(g) \longrightarrow CoO + 0{,}5\,Na_2O(l) + 0{,}5\,H_2O(g)$	-117,1	-115,0	-112,8
13	$Co + 2\,NaOH \longrightarrow CoO + Na_2O + H_2$	171,4	163,2	155,3
14	$Cu + 2\,NaOH(l) \longrightarrow CuO(s) + Na_2O(l) + H_2$	262,9	256,4	250,1
15	$Cu + NaOH(l) + 0{,}5\,O_2(g) \longrightarrow CuO(s) + 0{,}5\,Na_2O(l) + 0{,}5\,H_2O(g)$	-25,6	-21,8	-18,0

С термодинамической точки зрения для процесса взаимодействия карбида вольфрама с гидроксидом натрия наиболее предпочтительным является реакция 9 (Таблица 1), но возможны и другие реакции (реакции 4–8, 10–11, Таблица 1).

Металлические компоненты твердого сплава (никель, кобальт, медь) предпочтительно должны окисляться расплавом гидроксида натрия в атмосфере кислорода по реакции 11, 13, 16 (Таблица 1).

Реакции окисления компонентов твердого сплава (WC, Co, Ni, Cu) с выделением водорода термодинамически невозможны, что является важным с точки зрения техники безопасности.

Результаты исследований.

В дополнение к реакциям, приведённым в Таблице 1, были рассчитаны равновесные составы смесей (WC + NaOH) в инертной атмосфере и в атмосфере влажного воздуха. В качестве исходных данных принято WC – 1 кмоль и NaOH – 50 кмоль. Расчёт также был выполнен с использованием программного комплексе HSC-9.9 [12]. На Рисунке 1 приведён равновесный состав указанной смеси в зависимости от температуры.

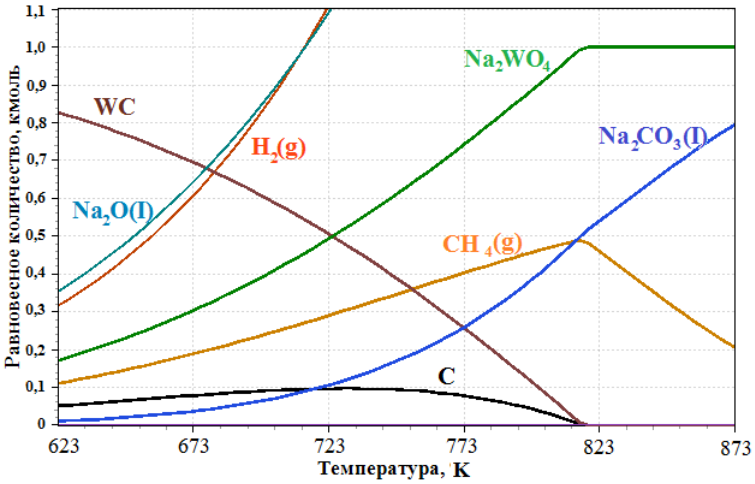

Рис. 1. Зависимость равновесного состава системы NaOH (50 кмоль)–WC(1 кмоль) от температуры в инертной атмосфере

Fig. 1. Dependence of the equilibrium composition of the NaOH (50 kmol)–WC (1 kmol) system on temperature in an inert atmosphere

Из рисунка 1 видно, что растворение WC в NaOH происходит даже в инертной атмосфере, но степень растворения сильно зависит от температуры. При 623 К растворяется примерно 0,82 кмоль карбида вольфрама, растворимость с температурой постепенно возрастает и при 818 К весь WC растворяется в NaOH.

Далее нами было проведено моделирование равновесного состава системы при температуре 673 К при постепенном добавлении WC от 0 до 1,0 кмоль. На рисунке 2 представлена зависимость равновесного состава вещества от количества добавляемого гидроксида натрия при температуре 673 К.

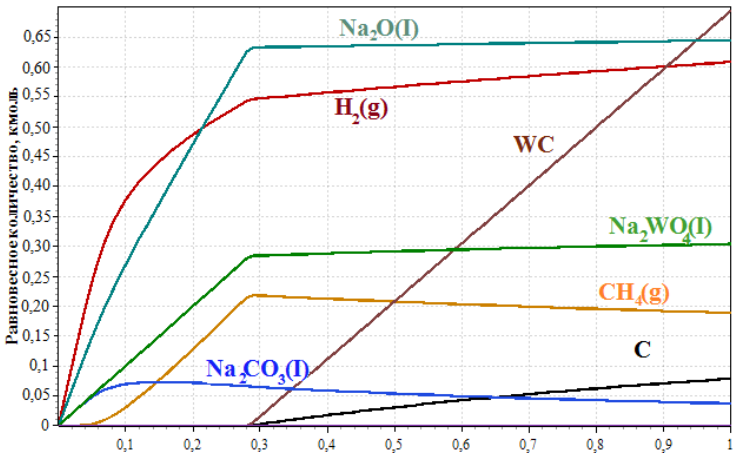

Рис. 2. Зависимость равновесного состава смеси от количества добавленного карбида вольфрама в инертной атмосфере при 673 К к 50 кмолям NaOH

Fig. 2. Dependence of the equilibrium composition of the mixture on the amount of added tungsten carbide in an inert atmosphere at 673 K to 50 kmol NaOH

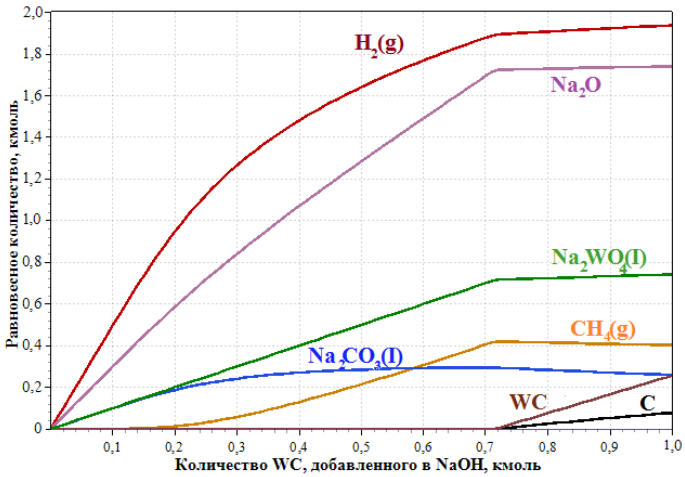

Рис. 3. Зависимость равновесного состава смеси от количества добавленного карбида вольфрама в инертной атмосфере при 773 K к 50 кмолям NaOH

Fig. 3. Dependence of the equilibrium composition of the mixture on the amount of added tungsten carbide in an inert atmosphere at 773 K to 50 kmol NaOH

На Рис. 3 представлена аналогичная зависимость при температуре 773 K.

Данные зависимости (Рис. 2 и 3) показывают, что при температуре 673 K карбид вольфрама растворяется при добавлении до 0,28 кмоль, а при температуре 773 K – до 0,74 кмоль.

Следующим этапом наших исследований было термодинамическое исследование равновесных составов NaOH–WC в воздушной атмосфере при разных температурах.

Нами был принят следующий модельный состав воздуха: O_2 – 21%; H_2O – 3%, N_2 – 76%. Построенная зависимость равновесного состава смеси NaOH (50 кмоль)–WC (1 кмоль) от количества добавляемого кислорода в составе воздуха показывает, что NaOH непрерывно расходуется, а реакция взаимодействия карбида вольфрама с гидроксидом натрия при температуре 673 K фактически завершается после подачи 1,03 кмоль O_2 в составе влажного воздуха (Рис. 4), а при температуре 773 K – 0,57 кмоль O_2 (Рис. 5). Основными продуктами взаимодействия являются Na_2CO_3 и Na_2WO_4, CH_4, Na_2O, H_2.

По данным таблицы 1 можно предположить, что в инертной атмосфере взаимодействие WC с NaOH не происходит. Однако равновесные составы, показанные на Рис. 1-3 говорят о том, что частичное протекание взаимодействия всё же возможно. Как можно видеть из Рис. 1-3 при взаимодействии WC + NaOH одновременно образуются несколько веществ. Например, возможны реакции:

$$\mathrm{WC}+7.33\,\mathrm{NaOH}(l) \rightarrow 3\,\mathrm{H_2}+2.33\,\mathrm{Na_2O}(l)+\mathrm{Na_2WO_4}(l)+0.333\,\mathrm{Na_2CO_3}(l)+0.333\,\mathrm{CH_4}+0.333\,\mathrm{C}$$

$$\Delta G = +108\,\mathrm{kJ/mol}, \quad K = 5.36\times10^{-8}\,\text{при}\,773\,\mathrm{K}$$

$$\mathrm{WC}+8\,\mathrm{NaOH}(l) \rightarrow 3\,\mathrm{H_2}+2.5\,\mathrm{Na_2O}(l)+\mathrm{Na_2WO_4}(l)+0.5\,\mathrm{Na_2CO_3}(l)+0.5\,\mathrm{CH_4}$$

$$\Delta G = +116\,\mathrm{kJ/mol}, \quad K = 1.4\times10^{-8}\,\text{при}\,773\,\mathrm{K}$$

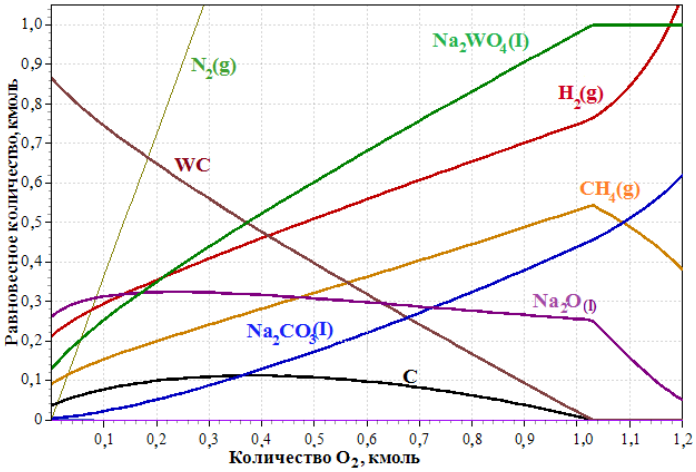

Рис. 4. Зависимость равновесного состава смеси NaOH (50 кмоль)–WC(1 кмоль) от количества добавленного кислорода (в составе воздуха O_2 – 21%; H_2O – 3%, N_2 – 76%) при температуре 673 K

Fig. 4. Dependence of the equilibrium composition of the NaOH (50 kmol)–WC (1 kmol) mixture on the amount of added oxygen (in the air composition O_2 – 21%; H_2O – 3%, N_2 – 76%) at a temperature of 673 K

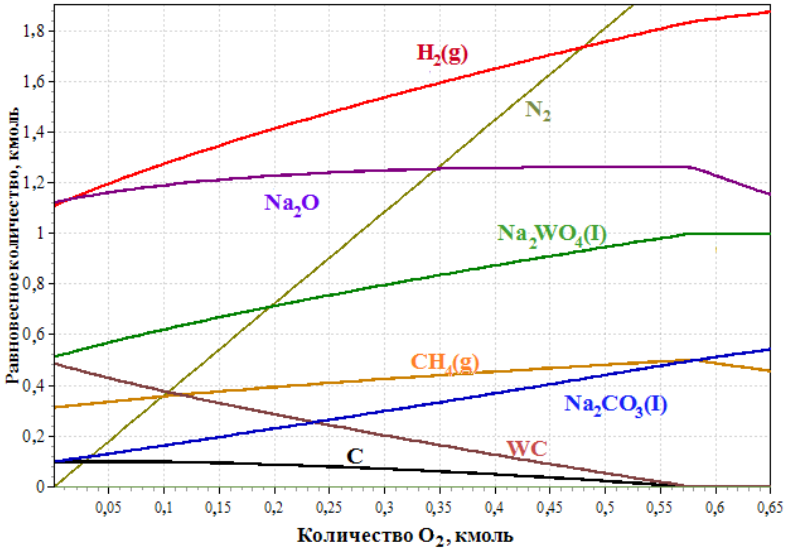

Рис. 5. Зависимость равновесного состава смеси NaOH (50 кмоль)–WC(1 кмоль) от количества добавленного кислорода (в составе воздуха O_2 – 21%; H_2O – 3%, N_2 – 76%) при температуре 773 K

Fig. 5. Dependence of the equilibrium composition of the NaOH (50 kmol)–WC (1 kmol) mixture on the amount of added oxygen (in the air composition O_2 – 21%; H_2O – 3%, N_2 – 76%) at a temperature of 773 K

Константа реакции это отношение произведения концентраций (активностей) продуктов реакции к произведению концентраций (активностей) исходных веществ. Если оперировать в мольных долях, то концентрация [NaOH] = 1 и [WC] = 1 (твёрдое вещество).

То есть знаменатель константы равновесия реакции (2) равен единице. Тогда константа реакции (2) записывается следующим образом:

$$K = P_{H_2}^3 \times [Na_2O]^{2,5} \times [Na_2WO_4] \times [Na_2CO_3]^{0,5} \times P_{CH_4}^{0,5} = 1,4 \cdot 10^{-8}.$$

Концентрации всех веществ разные, но для грубой оценки порядка их величины, примем, что они одинаковые и равны x. Тогда получаем:

$$x^{7,5} = 1,4 \cdot 10^{-8}; \quad x = 8,97 \cdot 10^{-2} \sim 0,1 \text{ мольных долей.}$$

Таким образом, взаимодействие WC + NaOH частично протекает и в инертной атмосфере. Если бы для этого взаимодействия было бы $\Delta G < 0$, оно происходило бы полностью, до конца. Но, в нашем случае, $\Delta G \sim +100$ кДж/моль, что соответствует константе реакции $K \sim 10^{-8}$.

Химическое и электрохимическое растворение твердосплавной матрицы алмазного инструмента в расплаве гидроксида натрия.

Для установления механизма электрохимического растворения ВК6 в расплаве NaOH нами был измерены потенциалы вольфрамового и ВК6 электродов относительно электрода сравнения Ni/NiO.

Электродвижущая сила неравновесной цепи составила для:

$$\text{Ni, W/NaOH/Ni/NiO/Ni}; \quad E = 0,249 \pm 0,05 \text{ В}$$

$$\text{Ni, ВК6/NaOH/Ni/NiO/Ni}; \quad E_p = 0,095 \pm 0,01 \text{ В}$$

Далее мы исследовали процесс анодного растворения металлического вольфрама и вольфрам-кобальтового сплава ВК6 методом циклической вольтамперометрии в расплаве NaOH при температуре 673 К (Рис. 6, 7).

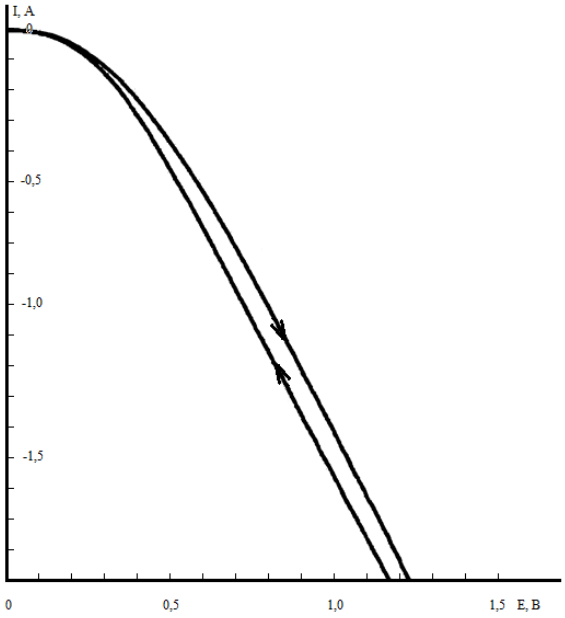

Рис. 6. Циклическая вольтамперограмма процесса электрохимического растворения металлического вольфрама в расплаве NaOH при температуре 673 К, скорости поляризации 0,1 В/с. Электрод сравнения – Ni/NiO

Fig. 6. Cyclic voltammogram of the process of electrochemical dissolution of metallic tungsten in molten NaOH at a temperature of 673 K, polarization rate of 0.1 V/s. Reference electrode – Ni/NiO

Из сравнения вольтамперограмм процесса анодного растворения металлического вольфрама и вольфрам-кобальтового сплава ВК6 вытекает (Рис. 6, 7), что процессу растворения карбида вольфрама предшествует процесс анодного растворения металлического кобальта при потенциале 0,7–0,8 В, а при потенциале 1,7–1,8 В происходит полное растворение твердого сплава ВК6 в исследуемом расплаве NaOH при температуре 673 К.

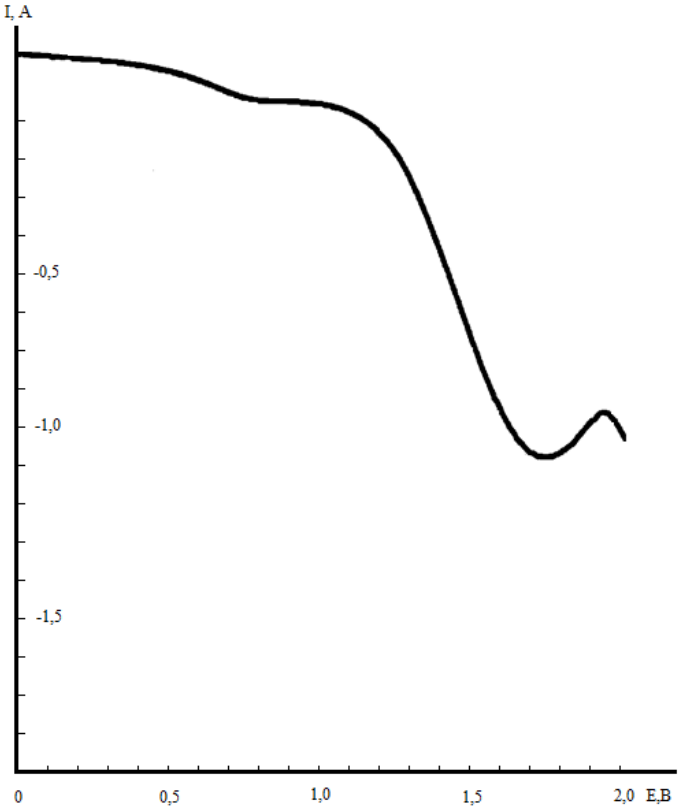

Рис. 7. Вольтамперограмма процесса электрохимического растворения вольфрам-кобальтового сплава ВК6 в расплаве NaOH при температуре 673 К, скорости поляризации 0,1 В/с. Электрод сравнения – Ni/NiO

Fig. 7. Voltamgram of the process of electrochemical dissolution of tungsten-cobalt alloy VK6 in NaOH melt at a temperature of 673 K, polarization rate of 0,1 V/s. Reference electrode – Ni/NiO

Исследование скорости химического и электрохимического растворения вольфрам-кобальтового сплава ВК6.

По результатам экспериментально измеренных скоростей химического и электрохимического растворения вольфрам-кобальтового сплава ВК6 в расплаве гидроксида натрия, были построены зависимости скоростей растворения от температуры (Рис. 8, 9).

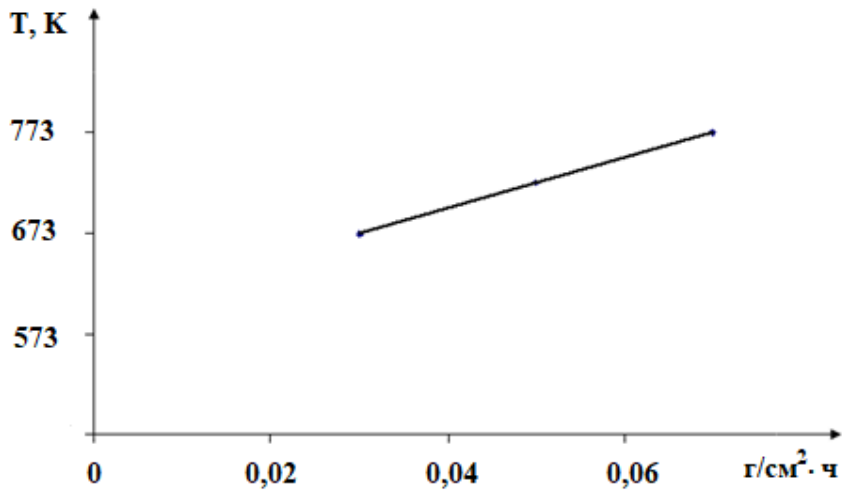

Рис. 8. Зависимость скорости химического растворения ВК6 от температуры в расплаве NaOH

Fig. 8. Dependence of the rate of chemical dissolution of VK6 on the temperature in the NaOH melt

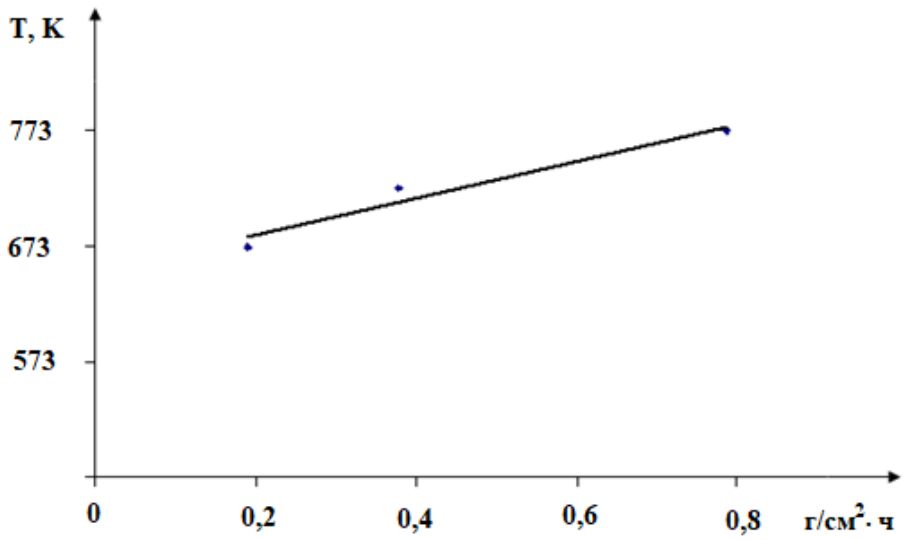

Рис. 9. Зависимость скорости электрохимического растворения ВК6 от температуры в расплаве NaOH

Fig. 9. Dependence of the rate of electrochemical dissolution of VK6 on the temperature in the NaOH melt

В Табл. 2 приведено сопоставление скоростей растворения ВК6 в зависимости от температуры при химическом и электрохимическом растворении.

Таблица 2. Сравнение скоростей химического и электрохимического растворения от температуры

Table 2. Comparison of the rates of chemical and electrochemical dissolution depending on temperature

Тип растворения / отношение скоростей в расплаве NaOH	**Скорость растворения, г/см^2·ч**		
	673 K	723 K	773 K
Химическое растворение	0,03	0,05	0,07
Электрохимическое растворение	0,19	0,38	0,79
Отношение скор. хим. к скор. электрохим.	6,33	7,6	11,3

Как видно из сравнения скоростей растворения ВК6 при химическом и электрохимическом растворении, с ростом температуры оба процесса возрастают (Рис. 8, 9). Однако, скорость электрохимического растворения значительно (в 6–11 раз) превосходит скорость химического растворения ВК6 при одинаковых условиях.

Далее мы измеряли скорости растворения стали СТ-3 и вольфрам-кобальтового сплава ВК6 в расплаве NaOH.

Образцы стали (СТ-3) и вольфрам-кобальтового сплава (ВК6) выдерживали в бестоковом состоянии в расплаве при различных промежутках времени (до 5 ч.) и по разности масс определяли скорость коррозии. На Рис. 10. представлены зависимости скорости коррозии СТ-3 и ВК6 от времени в расплаве NaOH. При времени выдержки более 5 часов скорость коррозии в бестоковом состоянии становится постоянным и составляет для СТ-3 и ВК6 (0,0008±0,00001) и (0,053±0,002) г/см^2.ч, соответственно.

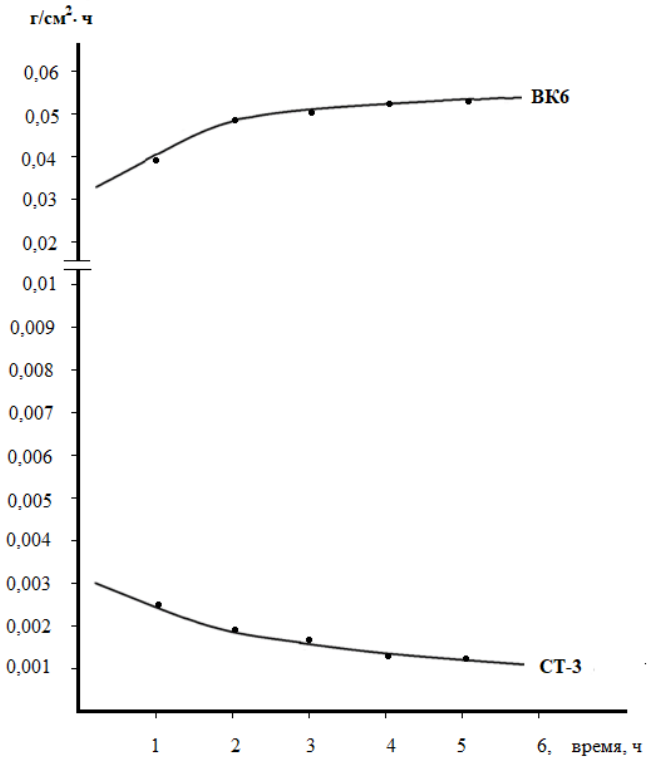

Рис. 10. Зависимость скорости химического растворения Ст-3 и ВК6 от времени в расплаве NaOH при температуре T=773K

Fig. 10. Dependence of the rate of chemical dissolution of St-3 and VK6 on time in NaOH melt at temperature T=773K

Из сопоставления этих данных следует, что скорость коррозии ВК6 на порядок выше скорости коррозии СТ-3. Это объясняется тем, что на поверхности СТ-3 образуется пассивирующая пленка, подавляющая процесс коррозии.

Заключение.

1. Проведен термодинамический анализ реакций взаимодействия компонентов твердосплавной матрицы алмазного инструмента с расплавам гидроксидом натрия в инертной и воздушной атмосфере.

2. Показано, что в воздушной атмосфере основными продуктами взаимодействия являются вольфрамат натрия, карбонат натрия, оксиды углерода, кобальта, никеля, меди и вода.

3. Установлено, что скорость электрохимического растворения на порядок выше, чем при химическом растворении.

4. Экспериментально установлено, что скорость коррозии ВК6 на порядок выше скорости коррозии стали СТ-3.

Список использованных источников

1. *Хазан А. З., Резниченко В. А., Липихина М. С.* Переработка отходов вольфрам-кобальтовых твердых сплавов окислительно-восстановительным способом // Цветные металлы. 1989. № 7. С. 95–98.
2. *Чистякова В. А, Попов В. А.* Переработка отходов твердо-сплавного производства «цинковым методом» // Цветные металлы. 1991. № 2. С. 47–48.
3. *Мирзавалиев Д. Б., Парманов С. Т., Улугов Г. Д.* Переработка вольфрамсодержащих отходов и получение раствора вольфрамата натрия // Universum: технические науки: электрон. научн. журнал. 2023. № 10(115). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16175 (дата обращения: 10.01.2023)
4. *Kojima T., Shimizu T., Sasai R. et al.* Recycling process of WC-Co cermets by hydrothermal treatment // J. Mater Sci. 2005. Vol. 40. Pp. 5167–5172. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-005-4407-0
5. *Li M., Xi X., Nie Z., Ma L., Liu Q.* Recovery of tungsten from WC-Co hard metal scraps using molten salts electrolysis // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8, Iss. 1. Pp. 1440–1450. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.jmrt.2018.10.010
6. *Zeiler B., Bartl A., Schubert W.-D.* Recycling of tungsten: current share, economic limitations, technologies and future potential // International Journal of Refractory Metal and Hard Materials. 2021. Vol. 98. Art. no. 105546.
7. *Kotiyar P. K., Randhawa N. S.* Corrosion behavior of WC tool bits in simulated concrete, soil and mine solutions with and without chloride additions // Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Vol. 85. Pp. 1050–1062.
8. *Sampath A., Sudarshan T. S.* Recycling of WC-Co from scrap materials // Powder Metallurgy. 2002. Vol. 45, Iss. 1. Pp. 21–24.
9. *Katiyar P. K., Randhawa N. S.* A comprehensive review on recycling methods for cemented tungsten carbide scrap highlighting the electrochemical techniques // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2020. Vol. 90. Art. no. 105251.
10. *Shemi A. et al.* Recycling of tungsten carbide metal: a review of recycling methods and future prospects // Minerals Engineering. 2018. Vol. 122. Pp. 195–205.
11. *Zaichenko V. N. et al.* Recovery of tungsten and cobalt from secondary raw materials by combined electrochemical and chemical – procedure // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83, No. 9. Pp. 1660–1662.

12. Roine. HSC Chemistry® [Software]. Outotec, Pori, 2018. Доступно на сайте: www.outotec.com/HS

Поступила 13.02.2026; одобрена после рецензирования 24.02.2026; принята к публикации 03.03.2026.

Об авторах:

Кушхов Хасби Билялович, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической и физической химии Кабардино-Балкарского Государственного университета им. Х. М. Бербекова, действительный член АМАН, Заслуженный деятель науки РФ, (Нальчик, Россия), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8613-9868, SPIN-код: 8268-6590, hasbikushchov@yahoo.com

Лигидова Марина Нургалиевна, кандидат химических наук, доцент кафедры неорганической и физической химии, Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х. М. Бербекова (Нальчик, Россия), ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6016-7236, SPIN-код: 7249-7762, adamokova1@mail.ru

Потапов Алексей Михайлович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории коррозии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (Екатеринбург, Россия), SPIN-код: 1748-4897, A.Potapov_50@mail.ru

Шогенова Мадина Аслановна, ведущий инженер кафедры неорганической и физической химии, Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х. М. Бербекова (Нальчик, Россия), SPIN-код: 7958-8106, madina.tlimakhova@mail.ru

Нурнепесова Гултач Аннанепесовна, студент магистратуры ИМиЕН КБГУ, Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х. М. Бербекова (Нальчик, Россия), g.nurnepesova@icloud.com

References

1. *Khazan A. Z., Reznicenko V. A., Lipikhina M. S.* Recycling of tungsten-cobalt hard alloy waste by the oxidation-reduction method // Non-ferrous metals. 1989. No. 7. Pp. 95–98.
2. *Chistyakova V. A., Popov V. A.* Recycling of hard-alloy production waste by the "zinc method"// Non-ferrous metals. 1991. No. 2. Pp. 47–48.
3. *Mirzavaliev D. B., Parmanov S. T., Ulugov G. D.* Recycling of tungsten-containing waste and obtaining a sodium tungstate solution // Universum: technical sciences: electronic scientific journal. 2023. No. 10(115). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16175 (date of access: 10.01.2023)
4. *Kojima T., Shimizu T., Sasai R. et al.* Recycling process of WC-Co cermets by hydrothermal treatment // J. Mater Sci. 2005. Vol. 40. Pp. 5167–5172. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-005-4407-0
5. *Li M., Xi X., Nie Z., Ma L., Liu Q.* Recovery of tungsten from WC-Co hard metal scraps using molten salts electrolysis // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8, Iss. 1. Pp. 1440–1450. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.jmrt.2018.10.010
6. *Zeiler B., Bartl A., Schubert W.-D.* Recycling of tungsten: current share, economic limitations, technologies and future potential // International Journal of Refractory Metal and Hard Materials. 2021. Vol. 98. Art. no. 105546.
7. *Kotiyar P. K., Randhawa N. S.* Corrosion behavior of WC tool bits in simulated concrete, soil and mine solutions with and without chloride additions // Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Vol. 85. Pp. 1050–1062.

8. *Sampath A., Sudarshan T. S.* Recycling of WC-Co from scrap materials // Powder Metallurgy. 2002. Vol. 45, Iss. 1. Pp. 21–24.
9. *Katiyar P. K., Randhawa N. S.* A comprehensive review on recycling methods for cemented tungsten carbide scrap highlighting the electrochemical techniques // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2020. Vol. 90. Art. no. 105251.
10. *Shemi A. et al.* Recycling of tungsten carbide metal: a review of recycling methods and future prospects // Minerals Engineering. 2018. Vol. 122. Pp. 195–205.
11. *Zaichenko V. N. et al.* Recovery of tungsten and cobalt from secondary raw materials by combined electrochemical and chemical – procedure // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83, No. 9. Pp. 1660–1662.
12. Roine. HSC Chemistry® [Software]. Outotec, Pori, 2018. Доступно на сайте: www.outotec.com/HS

Submitted 13.02.2026; approved after reviewing 24.02.2026; accepted for publication 03.03.2026.

About the authors:

Kushkhov Khasbi Bilyalovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Inorganic and Physical Chemistry at the Kabardino-Balkarian State University named after Kh. M. Berbekov (Nalchik, Russia), Full member of IAAS, Honored Scientist of the Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8613-9868, SPIN code: 8268-6590, hasbikushchov@yahoo.com

Ligidova Marina Nurgalievna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Kabardino-Balkarian State University named after Kh. M. Berbekova (Nalchik, Russia), ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6016-7236, SPIN code: 7249-7762, adamokova1@mail.ru

Potapov Aleksey Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Corrosion Laboratory, Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia), SPIN code: 1748-4897, A.Potapov_50@mail.ru

Shogenova Madina Aslanovna, Assistant, Department of Inorganic and Physical Chemistry, Kabardino-Balkarian State University named after Kh. M. Berbekova (Nalchik, Russia), SPIN code: 7958-8106, madina.tlimakhova@mail.ru

Nurnepesova Gultach Annanepesovna, master's student at the Institute of Mathematics and Natural Sciences of the Kabardino-Balkarian State University named after Kh. M. Berbekov (Nalchik, Russia), g.nurnepesova@icloud.com