

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.762

**ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕЗВОЛЬФРАМОВЫХ
ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПЕРЕРАБОТКОЙ ОТХОДОВ СПЛАВА ТН20
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ В ВОДЕ**© 2025 г. Е. В. Агеева^{1, *}, А. Е. Агеева¹¹Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

*e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 10.10.2024 г.

Принята к публикации 20.10.2024 г.

В статье представлены результаты исследования состава, структуры и свойств высокопрочных безвольфрамовых твердых сплавов на основе порошков, полученных переработкой отходов сплава ТН20 электроэрозионным диспергированием в воде. Показано, что использование метода искрового плазменного спекания для изготовления твердосплавных изделий из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ТН20, позволило повысить физико-механические свойства безвольфрамового твердого сплава за счет мелкозернистого строения, равномерного распределения карбидных фаз и отсутствие значительных пор, трещин и несплошностей.

Ключевые слова: безвольфрамовый твердый сплав, электроэрозионное диспергирование, вода, порошок, искровое плазменное спекание, свойства

DOI: 10.31857/S0235711925010119, **EDN:** EQANSJ

В настоящее время промышленное производство безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС) предусматривает спекание порошков в вакууме при температуре 1300–1350°C и выдержке 0.5–1 ч, что приводит к наличию пористости до 2% и снижению прочности и стойкости режущего инструмента в целом [1–3].

При этом основные направления исследований, связанные с проблемой получения высокопрочных безвольфрамовых твердых сплавов с низкой себестоимостью, решается следующим образом: 1) применением мелкодисперсного порошка на основе карбида титана, получаемого путем переработки отходов БВТС [4–8]. Отмечено, что все промышленно применяемые способы получения порошков путем переработки отходов твердых сплавов отличаются крупнотоннажностью, энергоемкостью, большими производственными площадями, а также, зачастую, экологическими проблемами (сточные воды, вредные выбросы). В тоже время, отмечено, что одним из наиболее перспективных методов получения порошка, практически из любого токопроводящего материала, в том числе и твердого сплава, отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами, безвредностью и экологической чистотой процесса, отсутствием механического износа оборудования, получением порошка непосредственно из кусков твердого сплава различной формы за одну операцию, получением частиц преимущественно сферической формы размером от нескольких нанометров до сотен микрон является метод электроэрозионного

диспергирования (ЭЭД) [9, 10]; **2)** спеканием порошкового материала на основе карбида титана прямым пропусканием тока, позволяющим сохранить мелкозернистую структуру исходного порошка и получить спеченный материал с совершенной кристаллической решеткой [11–14].

Анализ источников научно-технической информации показал высокую эффективность применения технологии искрового плазменного спекания (ИПС), которая за счет короткого времени рабочего цикла, высокого давления и равномерного распределения тепла по образцу при воздействии на него импульсного электрического тока и так называемого «эффекта плазмы искрового разряда» обеспечивает при спекании порошков высокие физико-механические свойства сплава [15, 16].

Для решения поставленных задач сотрудниками научно-образовательного центра «Порошковая металлургия и функциональные покрытия» ЮЗГУ разработано и запатентовано оборудование и технология получения частиц сферической формы путем измельчения любых токопроводящих металлоотходов электроэрозией в жидкой рабочей среде и технология их спекания, обеспечивающая практически беспористую структуру. К настоящему времени разработанный способ измельчения металлоотходов в промышленности практически не применяется, ввиду отсутствия полноценных комплексных сведений о составе, структуре и свойствах диспергированных электроэрозией частиц, а также сплавов, полученных на их основе.

Целью настоящей статьи являлось исследование состава, структуры и свойств высокопрочных безвольфрамовых твердых сплавов на основе порошков, полученных переработкой отходов сплава ТН20 электроэрозионным диспергированием в воде.

Материалы и методики исследований. Для получения безвольфрамового твердосплавного порошка использовали отходы твердого сплава марки ТН20, которые измельчали методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде на экспериментальной установке [17]. При диспергировании отходов ТН20 использовали следующие параметры установки: емкость конденсаторов 60.0–62.5 мкФ, напряжение на электродах 120–140 В и частота следования импульсов 120–140 Гц. Твердосплавный безвольфрамовый порошок получали в следующей последовательности.

На первом этапе проводили сортировку твердосплавных отходов, их промывку, сушку, обезжиривание и взвешивание. Реактор заполняли рабочей средой — водой дистиллированной, отходы загружали в реактор.

На втором этапе — этапе электроэрозионного диспергирования включали установку. Процесс ЭЭД представлен на рис. 1. В начале осуществлялась сборка электродов 5 и 6 из диспергируемых отходов твердого сплава 8. Далее в реактор 3 загружались гранулы диспергируемого сплава ТН20 8 и заливалась рабочая жидкость — вода дистиллированная 10. На пульте управления генератора импульсов 2 устанавливались требуемые для электродиспергирования металлоотходов параметры: емкость разрядных конденсаторов и частота следования импульсов. Затем при помощи регулятора напряжения 1 устанавливалось такое напряжение, при котором происходил электрический пробой рабочей жидкости 10, находящийся в межэлектродном пространстве. При образовании канала разряда куски твердого сплава в точке разряда плавилась и испарялась. Рабочая жидкость 10 в канале электрического разряда также кипела и испарялась, образуя газовый пузырь 9. Капли расплавленного и испаряющегося твердого сплава попадали в жидкую рабочую среду с образованием сферических и эллиптических частиц 7, а также агломератов. Встряхиватель 4 перемещал один из электродов и обеспечивал непрерывное протекание процесса электродиспергирования.

На третьем этапе проводится выгрузка рабочей жидкости с твердосплавным безвольфрамовым порошком из реактора. Растровое электронно-микроскопическое изображение электроэрозионных твердосплавных порошков, полученное

на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды), представлено на рис. 2.

На четвертом этапе подвергали искровому плазменному спеканию в системе SPS25–10 «Thermal Technology» (США) при температуре $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении $P = 40\text{ МПа}$ и времени выдержки $t = 10\text{ мин}$. Схема спекания безвольфрамового твердосплавного порошка представлена на рис. 3.

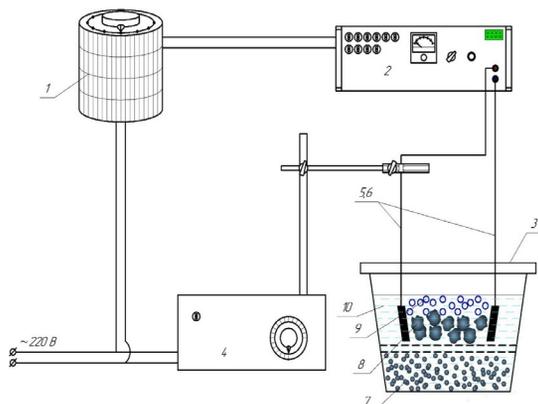


Рис. 1. Процесс ЭЭД сплава TN20.

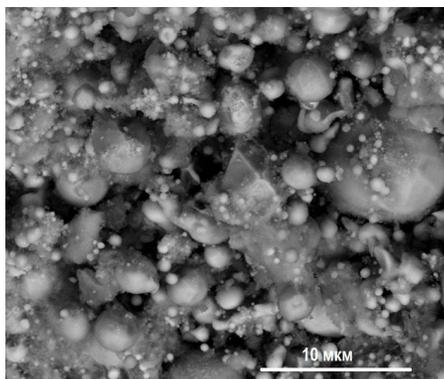


Рис. 2. Растровое электронно-микроскопическое изображение электроэрозионных твердосплавных порошков.

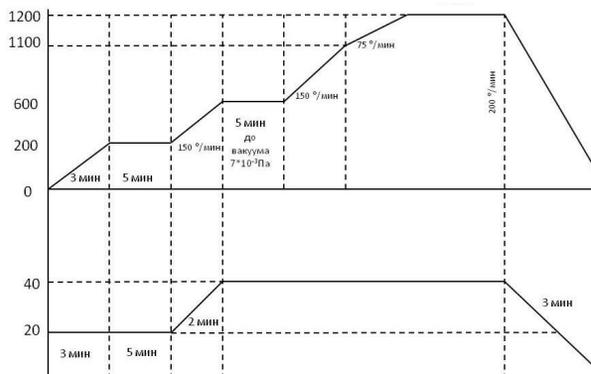


Рис. 3. Схема спекания безвольфрамового твердосплавного порошка.

Полученное спеченное твердосплавное изделие исследовали различными методами. Рентгеноспектральный микроанализ сплавов проводили на энергодисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы «EDAX» (Нидерланды), встроенном в растровый электронный микроскоп «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды); фазовый анализ сплавов выполняли на рентгеновском дифрактометре «Rigaku Ultima IV» (Япония); механическую обработку образцов сплавов проводить на автоматическом высокоточном настольном отрезном станке «Асситом-5» (Дания) и шлифовально-полировальном станке «LaboPol-5» (Дания); микроструктуру сплавов исследовали на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды); пористость и размер зерна в сплавах исследовали на оптическом инвертированном микроскопе «OLYMPUS GX51» (Япония), оснащенного системой автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab»; микротвердость сплавов определяли с помощью прибора «Instron 402 MVD» (Великобритания); твердость сплавов по Роквеллу определяли с помощью прибора «Instron 600 MRD» (Великобритания); предел прочности при изгибе образцов сплавов определяли помощью прибора «Instron 300 LX-B1-C3-J1C» (Великобритания) и др.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ микроструктуры БВТС показал, что новые сплавы имеют мелкозернистое строение без включений, равномерное распределение фаз и отсутствие значительных пор, трещин и несплошностей (рис. 4).

На основе анализа спектра рентгеновской флуоресценции элементного состава БВТС установлено, что на поверхности сплава содержится кислород, а все остальные элементы Ti, Ni и Mo распределены относительно равномерно (рис. 5).

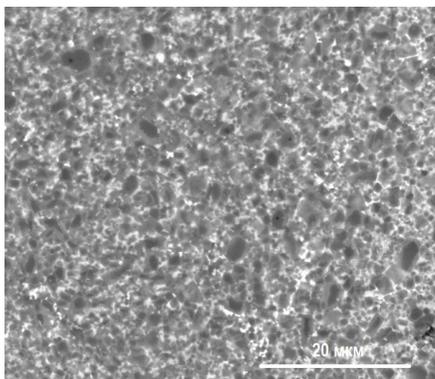


Рис. 4. Микроструктура БВТС.

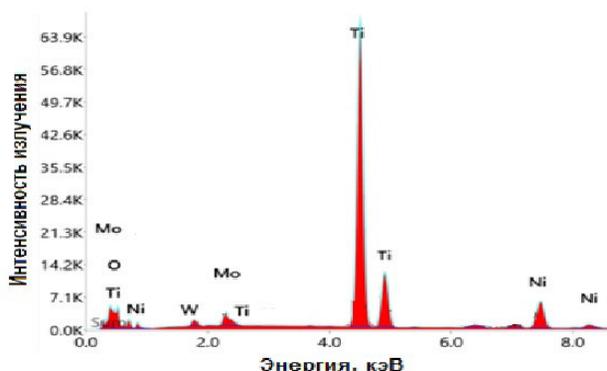


Рис. 5. Спектр рентгеновской флуоресценции элементного состава БВТС.

Анализ дифрактограммы фазового состава БВТС показал наличие в них карбидной фазы TiC, оксидных фаз Ti_3O_5 и Ti_6O и интерметаллидов $TiNi_3$ и $TiNi_2$ (рис. 6).

Основные характеристики БВТС, полученного ИПС электроэрозионных твердосплавных порошков представлены в табл. 1.

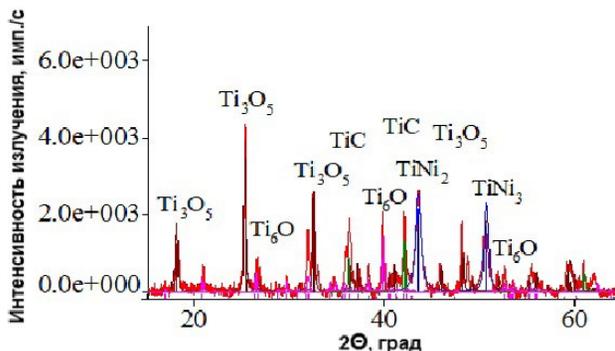


Рис. 6. Дифрактограмма фазового состава БВТС.

Таблица 1. Основные характеристики БВТС на основе порошков, полученных переработкой отходов сплава ТН20 электроэрозионным диспергированием в воде

Исследуемый параметр	Значение параметра
Плотность, г/см ³	6.2
	6.0
Размер зерна, мкм	0.58
	2.0
Пористость, %	0.12
	1.0
Микротвердость HV, МПа	10386
	10000
Твердость HRA	92
	90
Предел прочности при изгибе, МПа	1180
	1050

Примечание: В знаменателе представлены значения параметров промышленного сплава ТН20.

Экспериментально установлено, что новые БВТС, полученные искровым плазменным спеканием безвольфрамового твердосплавного порошка, имеют размер зерна порядка 0.58 мкм, а количество пор в них составляет до 0.12%. Мелкодисперсность и низкая пористость БВТС объясняется высокой дисперсностью исходной электроэрозионной шихты и эффекта «подавления роста зерна» при искровом плазменном спекании за счет короткого времени рабочего цикла, высокого давления и равномерного распределения тепла по образцу при воздействии на него импульсного электрического тока и так называемого «эффекта плазмы искрового разряда».

Экспериментально установлено, что новые БВТС, полученные искровым плазменным спеканием безвольфрамового твердосплавного порошка, имеют микротвердость порядка 10386 МПа. Повышению микротвердости способствует практически беспористой структурой и наличие высокотвердых фазовых составляющих.

Экспериментально установлено, что новые БВТС, полученные искровым плазменным спеканием безвольфрамового твердосплавного порошка, имеют твердость

порядка HRA 92, что выше по сравнению с аналогичными промышленными. Повышению твердости новых БВТС способствует мелкий размер зерна, высокая микротвердость, практически беспористая и бездефектная структурой и соответствующий фазовый состав.

Экспериментально установлено, что новые БВТС, полученные искровым плазменным спеканием безвольфрамового твердосплавного порошка, имеют предел прочности при изгибе порядка 1180 МПа. Экспериментально установлено, что новые безвольфрамовые твердые сплавы, полученные искровым плазменным спеканием безвольфрамового твердосплавного порошка, обладают более высоким пределом прочности по сравнению с промышленными сплавами. Повышению прочности новых сплавов способствует высокая дисперсность и сферическая форма частиц, а также относительно мелкий размер зерна и беспористая бездефектная структура.

Заключение. На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на исследование состава, структуры и свойств высокопрочных безвольфрамовых твердых сплавов на основе порошков, полученных переработкой отходов сплава ТН20 электроэрозионным диспергированием в воде, установлено следующее. **1.** На основе ресурсосберегающей технологии, предусматривающей рециклинг отходов сплавов ТН20, получен качественный недорогой безвольфрамовый твердосплавный порошок для производства из него инструментального сплава. **2.** Использование метода искрового плазменного спекания для изготовления твердосплавных изделий из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ТН20, позволило повысить физико-механические свойства безвольфрамового твердого сплава за счет мелкозернистого строения, равномерного распределения карбидных фаз и отсутствие значительных пор, трещин и несплошностей. **3.** Проведенные исследования подтверждают необходимость и актуальность разработки научных принципов и технологических основ получения сырья для производства безвольфрамовых твердых сплавов с качественно новыми эксплуатационными свойствами и низкой себестоимостью. Выбор порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов БВТС марки ТН20, обоснован его стоимостью и свойствами.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00316, <https://rscf.ru/project/24-29-00316/>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патрушев А. Ю., Фарафонов Д. П., Серов М. М. Безвольфрамовые твердые сплавы: методы получения, структура и свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). С. 66–81.
2. Панов В. С. Безвольфрамовые твердые сплавы: аналитический обзор // Материаловедение. 2019. № 10. С. 33–39.
3. Панов В. С., Ниткин Н. М. Безвольфрамовые твердые сплавы // Нанотехнологии: наука и производство. 2017. № 3. С. 65–70.
4. Наумова О. Г., Сопин К. В., Янюшкин А. С. Пути развития и проблемы создания безвольфрамовых твердых сплавов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки — развитию регионов. 2005. Т. 2. С. 209–212.
5. Valentov A. V., Konovodov V. V., Agafonova E. V. Forecasting residual and operating stress in soldering cutting tools with tungsten-free hard alloy inserts // Applied Mechanics and Materials. 2013. Т. 379. С. 28–31.
6. Акимов В. В. Исследование микротвердости безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбида титана // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. № 3-1 (23). С. 121–124.
7. Верещачка А. А., Хожжаев О. Повышение эксплуатационных характеристик инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с помощью наноструктурированных многослойно-

- композиционных покрытий // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 3 (43). С. 20–25.
8. *Акимов В. В., Мишуров А. Ф., Акимова Е. В.* Жаростойкость безвольфрамовых твердых сплавов TiC–TiNi в зависимости от объемного состава композиции при нагреве до высоких температур // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 10. С. 688–691.
 9. *Латыпова Г. Р., Карпенко Н. Н., Латыпов Р. А., Стрижеус В. А.* Структура и свойства спеченного изделия из порошка, полученного электроэрозией отходов стали P18 // Электрометаллургия. 2023. № 10. С. 34–39.
 10. *Карпенко Н. Н., Латыпова Г. Р., Латыпов Р. А., Андреева Л. П.* Свойства покрытий, полученных плазменно-порошковой наплавкой электроэрозионного порошка из отходов стали P18 // Технический сервис машин. 2023. Т. 61. № 4 (153). С. 61–67.
 11. *Бурков П. В.* Спекание порошков TiC–TiNi пропусканием электрического тока // Тяжелое машиностроение. 2008. № 12. С. 21–23.
 12. *Бурков П. В., Голофинова А. В., Буркова С. П.* Исследование структурной наследственности при спекании порошков TiC–TiNi пропусканием электрического тока // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2006. Т. 3. № 4. С. 94–97.
 13. *Бурков П. В.* Спекание порошков TiC–TiNi пропусканием электрического тока // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2005. № 3 (28). С. 11–13.
 14. *Акимов В. В., Мишуров А. Ф., Негров Д. А., Сидорова Я. А., Путинцев В. Ю.* Изменение микротвердости безвольфрамовых твердых сплавов при их облучении газометаллическим пучком ионов аргона и циркония // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2019. Т. 19. № 4. С. 19–26.
 15. *Батиенков Р. В., Морозова Т. А.* Электроискровое плазменное спекание порошков тугоплавких металлов и их соединений (обзор) // Металлург. 2023. № 1. С. 64–73.
 16. *Романов И. В., Задорожный Р. Н., Кудряшова Е. Ю.* Получение электродов методом искрового плазменного спекания вторичных порошковых материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19. № 11 (227). С. 511–515.
 17. *Ageeva E. V., Ageeva A. E.* Phase Composition of Titanium Powders Obtained for Additive Machines by Electrodipersion of OT4 Alloy Waste in Alcohol // J. of Mach. Manuf. and Reliab. 2024. V. 53. (4). P. 379–385.