

Е. В. Агеев, О. В. Кругляков, В. О. Поданов

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИСКРОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ
СПЕКАНИЕМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ ПОРОШКОВ СПЛАВА ЖС6У***

Юго-Западный государственный университет

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Представлены результаты исследования микротвердости и износостойкости жаропрочных сплавов, полученных искровым плазменным спеканием порошков, изготовленных электроэрозионным диспергированием отходов сплава ЖС6У в воде дистиллированной. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему рециклинга отходов сплавов ЖС6У и дальнейшее их использование и тем самым снизить себестоимость производства конечного продукта.

Ключевые слова: отходы жаропрочного сплава ЖС6У, электроэрозионное диспергирование, вода, порошок, искровое плазменное спекание, микротвердость, износостойкость.

© Агеев Е. В., Кругляков О. В., Поданов В. О., 2023.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (НШ-596.2022.4).

E. V. Ageev, O. V. Kruglyakov, V. O. Podanov

**INVESTIGATION OF MICROHARDNESS AND WEAR RESISTANCE
OF HEAT-RESISTANT ALLOYS OBTAINED BY SPARK PLASMA
SINTERING OF ELECTROEROSIVE POWDERS OF THE ALLOY ZHS6U**

South-West State University

The results of the study of microhardness and wear resistance of heat-resistant alloys obtained by spark plasma sintering of powders made by electroerosive dispersion of waste of the alloy ZhS6U distilled water are presented. Carrying out the planned measures will solve the problem of recycling waste of ZhS6U alloys and their further use and, thereby, reduce the cost of production of the final product.

Keywords: waste of heat-resistant alloy ZhS6U, electroerosive dispersion, water, powder, spark plasma sintering, microhardness, wear resistance.

Введение

В настоящее время жаропрочные сплавы нашли широкое распространение для изготовления лопаток турбин; самым распространенным из них является сплав ЖС6У. Данный сплав имеет предел сточасовой прочности при 1000 °С – 170...180 МПа. Верхний предел рабочих температур сплава ЖС6У составляет 1050...1100 °С. Данный сплав обладает очень высокой жаропрочностью, что затрудняет процесс его переработки и повторного использования [1–5].

В настоящее время одна из основных проблем использования сплава ЖС6У связана с наличием в его составе дорогостоящих компонентов, таких как Cr, Co, Ni, Nb, Mo, Ti и W, и необходимостью его повторного использования путем измельчения [6–9]. Одним из эффективных, но недостаточно изученных металлургических способов измельчения металлоотходов является электродиспергирование (ЭД).

Для разработки технологических рекомендаций по переработке металлоотходов сплава ЖС6У методом электроэрозионного диспергирования [10] в мелкодисперсные частицы с целью их повторного использования требуется проведение металлографических исследований.

Целью настоящей работы являлось исследование микротвердости и износостойкости жаропрочных сплавов, полученных искровым плазменным спеканием порошков, изготовленных электроэрозионным диспергированием отходов сплава ЖС6У в воде дистиллированной.

**Материалы и методы
проведения исследований**

Для получения никелевого порошка использовали отходы жаропрочного сплава марки ЖС6У, которые измельчали методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде на экспериментальной установке [10]. При диспергировании отходов ЖС6У использовали следующие параметры установки: напряжение на электродах 190...210 В; емкость конденсаторов 55...60 мкФ; частота следования импульсов 180...200 Гц. В результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами произошло разрушение отходов сплава с образованием частиц жаропрочного никелевого порошка.

Спекание жаропрочного никелевого порошка осуществляли в системе SPS 25-10 «Thermal Technology» (США) при температуре $T = 1300$ °С, давлении $P = 40$ МПа и времени выдержки $t = 10$ мин. Блок-схема методики спекания электроэрозионной шихты представлена на рис. 1.

Микротвердость сплавов определяли с помощью прибора «Instron 402 MVD» (Великобритания) при нагрузке на индентор 200 г по десяти отпечаткам со свободным выбором места укола в соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Время нагружения индентора составляло 15 с.

Блок-схема методики исследования микротвердости сплавов представлена на рис. 2.

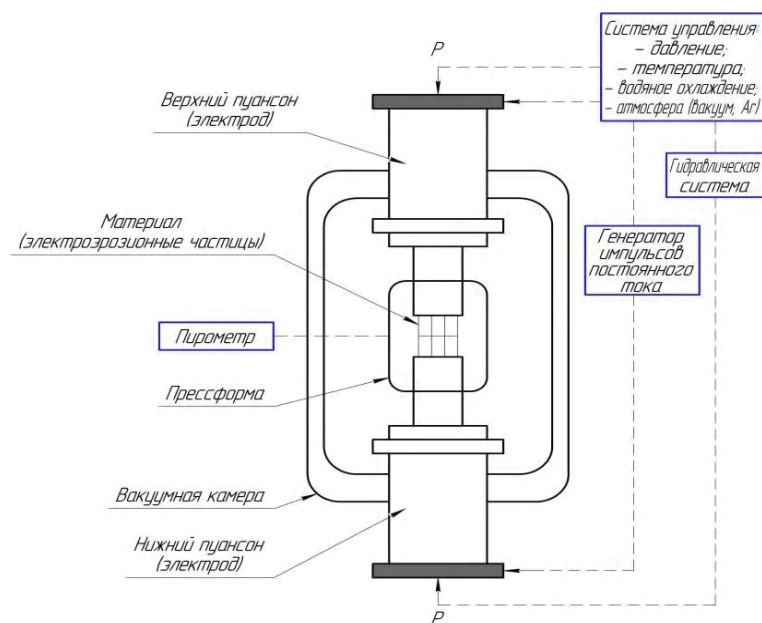


Рис. 1. Схема спекания электроэрозионной шихты ИПС



Микротвердомер цифровой DM8



Испытания проводили при нагрузке на индентор 0,981 Н по десяти отпечаткам со свободным выбором места укола в соответствии с ГОСТ 9450-76 (Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников). Время нагружения индентора составило 15 секунд



Выгрузка отчета, отображающего величину применяемой нагрузки, время нагружения, размеры диагоналей отпечатка, значение твердости, количество проведенных измерений, среднее значение твердости, статистика измерений.

Рис. 2. Блок-схема методики исследования микротвердости сплавов

Износостойкость образцов исследовали по стандартной схеме испытания «шарик – диск» на автоматизированной машине трения «Tribometer, CSM Instruments» (Швейцария).

Блок-схема методики исследования износостойкости сплавов представлена на рис. 3.

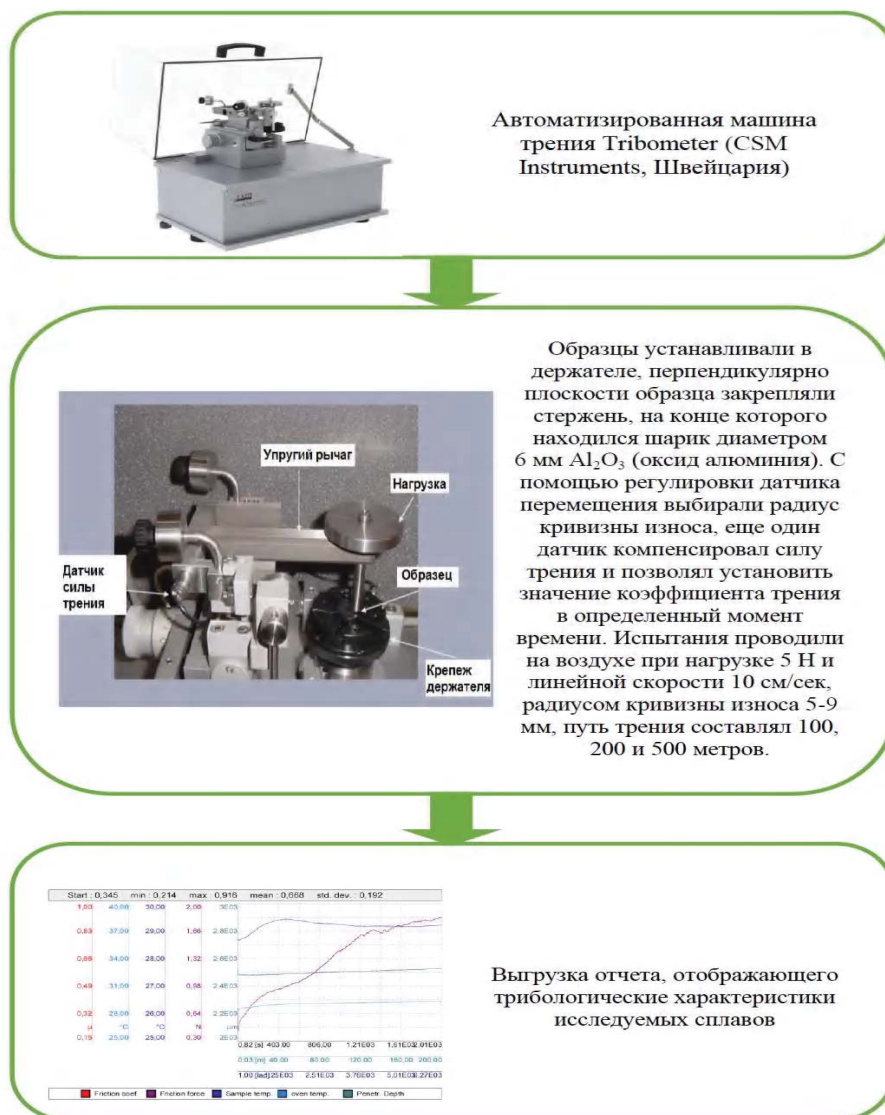


Рис. 3. Блок-схема методики исследования износостойкости сплавов

Результаты исследований

Результаты исследования микротвердости сплавов представлены в табл. 1.

Экспериментально установлено, что новые жаропрочные сплавы, полученные искровым плазменным спеканием жаропрочного никелевого порошка, обладают более высокой микротвердостью по сравнению с промышленными сплавами. Данный эффект достигается при искровом плазменном спекании диспергированных электроэрозией частиц практически беспористой структурой и наличием высокотвердых фазовых составляющих.

Результаты исследования объемного износа испытуемых образцов и зависимости коэффи-

Таблица 1

Микротвердость исследуемых сплавов

Номер отпечатка индентора	Значение микротвердости, $HV_{0.2}$
1	546
2	542
3	538
4	211
5	566
6	523
7	318
8	475
9	534
10	348
Среднее значение	460

циента трения от пути трения представлены в табл. 2 и на рис. 4 (исследования износостойкости сплавов проводили по стандартной схеме испытания «шарик – диск» на автоматизированной машине трения «Tribometer, CSM Instruments»).

Экспериментально установлено, что новые жаропрочные сплавы, полученные искровым плазменным спеканием жаропрочного никелевого порошка, имеют меньший объемный износ по сравнению с промышленными сплавами.

Таблица 2

Объемный износ исследуемых сплавов

Исследуемый параметр	Марка сплава
	ЖС6У
Объемный износ, мм ³	<u>1,286</u>
	1,788

Примечание: в знаменателе представлены значения параметров промышленных сплавов.

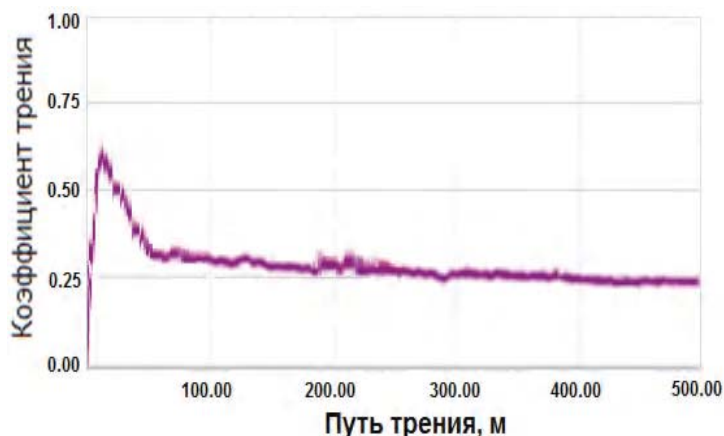


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения жаропрочных сплавов из электроэрозионной шихты от пути трения

Повышению износостойкости жаропрочных сплавов, полученных искровым плазменным спеканием жаропрочного никелевого порошка, способствуют высокая микротвердость, а также относительно мелкий размер зерна и беспористая бездефектная структура.

Исследование зависимостей коэффициента трения поверхности образцов исследуемых сплавов при нагрузке 5 Н и линейной скорости 15 см/с, радиусом кривизны износа 3 мм после многократных проходов показало, что его величина на пути трения 500 м составляет порядка 0,25.

Отмечен скачок коэффициента трения в первоначальный момент трибологических испытаний образцов, который связан с относительно высокой шероховатостью, и износ характеризуется сглаживанием твердых выступов поверхности образца.

Оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после многократных проходов по исследуемой поверхности образца, полученное на пути трения 500 м с использованием микроскопа OLYMPUS GX51, показало, что при использовании в качестве контртела (шарика) из стали марки Stainless Steel AISI 420 происходит частичный износ контртела и на-

липание продуктов изнашивания образца на контртело. При контакте поверхности образцов с контртелом из стали Stainless Steel AISI 420, выступы (шероховатость) на поверхности образцов являются ловушками для карбидов, задерживают их, в результате чего происходит сглаживание твердых выступов и перенос материала образца на контртело.

Выводы

1. На основании проведенных экспериментов, направленных на исследования микротвердости и износостойкости жаропрочных сплавов, полученных искровым плазменным спеканием порошков, изготовленных электроэрозионным диспергированием отходов сплава ЖС6У в воде дистиллированной, показана высокая эффективность применения технологии искрового плазменного спекания, 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.

2. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему рециклинга отходов

сплавов ЖС6У и дальнейшее их использование и тем самым снизить себестоимость производства новых жаропрочных сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование структуры сплава ЖС6У методом атомно-силовой микроскопии / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, Н. А. Давлеткильдеев, Г. Н. Миннеханов // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (97). – С. 24–29.
2. Еремин, Е. Н. Исследование карбидных фаз в сплаве ЖС6У / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, А. Е. Маталасова // Омский научный вестник. – 2014. – № 3 (133). – С. 59–63.
3. Исследование фазовых превращений в сплаве ЖС6У методами термического анализа / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, Г. Н. Миннеханов, Б. Е. Лопаев // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (117). – С. 63–68.
4. Belyaev M. S., Morozova L. V., Gorbovets M. A., Slavin A. V. High-cycle fatigue of single-crystal heat-resistant nickel alloy under the conditions of stress concentration // Metallurgist. – 2020. – Т. 63. – № 11–12. – С. 1237–1247.
5. Chekhovskoi V. Ya., Peletskii V. E. The thermophysical properties of khn55vmtkyu nickel-based heat-resistant alloy // High Temperature. – 2005. – Т. 43. – № 1. – С. 51–57.
6. Svistunova T. V., Estulin G. V. Effect of rare earth metals on the properties of heat-resistant nickel-chrome alloy // Metal Science and Heat Treatment. – 1961. – Т. 3. – № 9–10. – С. 432–434.
7. Baskov F. A., Bychkova M. Y., Sentyurina Z. A., Logachev I. A., Logacheva A. I. Structure and properties of ep741np heat-resistant nickel alloy produced by selective laser melting // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2021. – Т. 62. – № 3.
8. Korostelev A. B., Zharebtsov S. N., Sokolov I. P., Chumak-Zhun D. A. Modification of heat-resistant nickel alloy with a combined inoculator // Metallurgist. – 2011. – Т. 54. – № 9–10. – С. 711–713.
9. Применение газоизостатического прессования для повышения эксплуатационной надежности лопаток турбины из жаропрочного сплава типа ЖС6У / О. В. Новикова, В. А. Кочетков, А. И. Виноградов, А. А. Жуков, А. А. Тихонов, С. Ф. Маринин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 8. – С. 54–56.
10. Ageeva E. V., Ageev E. V., Podanov V. O. X-Ray Methods for Studying Powders Produced by Electrical Dispersion of the Waste Products of ZhS6U Heat-Resistant Nickel Alloy in Kerosene // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Vol. 17, No. 1. – Pp. 168–173.
11. Ageev, E. B. Оптимизация процесса изготовления жаропрочного никелевого сплава путем искрового плазменного спекания порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов ЖС6У в воде / Е. В. Агеев, В. О. Поданов, А. Е. Агеева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – № 4. – С. 170–174.
12. Изучение микроструктуры, легирующих элементов и распределения фаз в образцах сплава ЖС6У, спеченных из порошков электроэрозионного диспергирования отходов / Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, В. О. Поданов, М. И. Силенский // Электрометаллургия. – 2023. – № 4. – С. 34–38.