

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (32)
Сентябрь 2021

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией
Минобрнауки России

Главный редактор	КАЛГАНОВА СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Зам. главного редактора	БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Научный редактор	АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ответственный секретарь	ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Редакционная коллегия

В.В. ВАХНИНА	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
А.А. ЗАХАРОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.Б. КАЗАКОВ	д.т.н., профессор, ИГЭУ, Иваново
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.А. ФОМИН	д.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 3 (32)
September 2021

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The journal is included in the List peer-reviewed scientific publications, recommended for publication by the Higher Attestation Commission of the Ministry of education and science Russia

Editor-in-Chief	KALGANOVA SVETLANA GENNADIEVNA Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Assistant to the Editor-in-Chief	BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Scientific editor	ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Chief Executive Officer	YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Editorial Board Members

V.V. VAKHNINA	Dr.Sc., Professor, Togliatti State University, Togliatti
Yu.V. GULYAEV	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg
L.S. ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara
A.A. ZAKHAROV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.B. KAZAKOV	Dr. Sc., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo
A.N. MAKAROV	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver
G.A. MOROZOV	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan
Yu.P. PERELIGIN	Dr.Sc., Professor, Penza State University, Penza
A.F. REZCHIKOV	Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov
I.V. RODIONOV	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
Yu.B. TOMASHEVSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
A.A. FOMIN	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

ISSN 2309-6020

© Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

**Зязев М.Е., Гиззатуллин Э.В.,
Коняев А.Ю.** Моделирование
и исследование движения проводя-
щих частиц при сепарации в бегущем
магнитном поле 5

**Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И.,
Филиппов В.А., Нестеров С.А.**
Уточненный электромагнитный
анализ магнитожидкостных сепарато-
ров немагнитных материалов15

**Осипова Е.О., Маркелова О.А.,
Кошура В.А., Фомин А.А.**
Исследование влияния тока индукто-
ра на структуру и механические
свойства газотермических титановых
покрытий27

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

Гайнуллина Л.Р., Фасыхов А.Р.
Влияние механических примесей
на электрическую прочность
трансформаторного масла33

**Кузнецова Ю.А., Ясинский В.Б.,
Коробейников С.М.** Методика
моделирования предпробивных
полей в жидкости38

**Скворцов О.Б., Стащенко В.И.,
Троицкий О.А.** Силовое механиче-
ское воздействие электроимпульсов
на проводник48

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

**Доманов В.И., Мурзаков Д.Г.,
Халиуллов Д.С.** Математическая
модель асинхронного двигателя
с фазным ротором в системе коорди-
нат d-q 57

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

Чупрыненко М.И., Горячевский К.С.
Реализация защиты от дуговых
замыканий в условиях цифровой
подстанции 65

Козловский В.Н., Саксонов А.С.
Компьютерное моделирование
влияния технологических особенно-
стей формирования эллипсности
статора на электромеханические
характеристики автомобильной
синхронной генераторной установки 74

Андреев А.А. Исследование переход-
ного процесса в электрических сетях
среднего напряжения с замыканием
на землю 81

Александрович С.А., Зорина Т.Г.
Совершенствование тарифов
на энергоресурсы Республики Бела-
русь с целью стимулирования увели-
чения доли электрической энергии
в балансе энергоснабжения зданий 91

К сведению авторов 103

CONTENTS

ELECTRICAL ENGINEERING

- Zyazev M.E., Gizzatullin E.V., Konyaev A.Yu.** Modeling and research into motion of conducting particles under separation in the traveling magnetic field 5
- Kazakov Yu.B., Stradomsky Yu.I., Filippov V.A., Nesterov S.A.** Updated electromagnetic analysis of separators with magnetic fluids for non-magnetic materials15
- Osipova E.O., Markelova O.A., Koshuro V.A., Fomin A.A.** Effects of inductor current on the structure and mechanical properties of thermal spray coatings on titanium.....27

ELECTRICAL MATERIALS AND PRODUCTS

- Gaynullina L.R., Fasykhov A.R.** Influence of mechanical impurities on dielectric strength of transformer oil33
- Kuznetsova Yu.A., Yassinskiy V.B., Korobeynikov S.M.** Simulation of pre-breakdown fields in liquids38
- Skvortsov O.B., Stashenko V.I., Troitsky O.A.** Mechanical effects of electrical impulses on the conductor.....48

ELECTROMECHANICS

- Domanov V.I., Murzakov D.G., Khaliullof D.S.** Mathematical model of an induction motor with a wound rotor in the d-q coordinate system..... 57

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

- Chuprynenko M.I., Goryachevsky K.S.** Implementation of arc-fault protection in a digital substation area..... 65
- Kozlovskiy V.N., Saksonov A.S.** Computer modeling for effects of technological characteristics in forming stator ellipticity on electromechanical properties of vehicular synchronous generators..... 74
- Andreev A.A.** Investigation of the transient process in medium-voltage electrical networks with a ground fault 81
- Aliaksandrovich S.A., Zorina T.G.** Improvement of energy tariffs in the Republic of Belarus in order to stimulate an increase in the share of electricity in the energy balance system of buildings..... 91
- Information for Authors 103

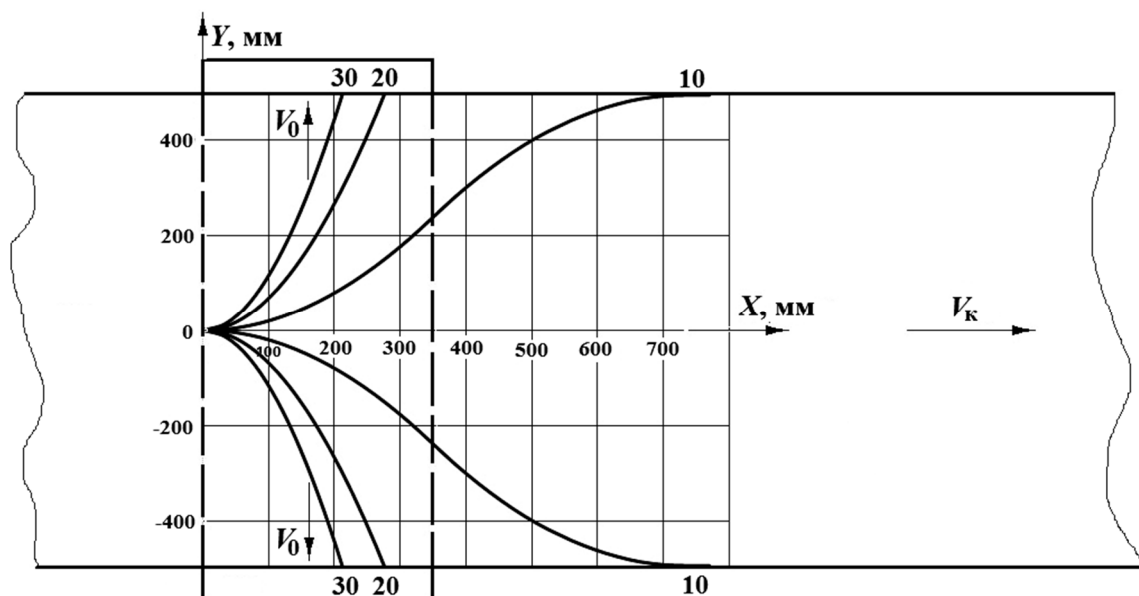


Рис. 6. Траектории движения проводящих частиц в сепараторе КМ-203М с двусторонним выходом металла

Таким образом, разработана методика расчета траекторий движения проводящих частиц в электродинамическом сепараторе на базе линейного индуктора, основанная на решении уравнений движения и учитывающая совместное действие на частицу электромагнитных и механических сил. Методика позволяет определять траектории движения частиц разной

крупности с разными физическими свойствами и оценивать работоспособность сепаратора уже на стадии проектирования. Результаты исследований подтвердили преимущества электродинамического сепаратора на основе линейного индуктора, создающего разбегающиеся магнитные поля, с двусторонним выходом металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексная стратегия обращения с твердыми коммунальными отходами в Российской Федерации (утверждена Приказом Минприроды России от 14.08.2013 № 298). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70345114..>
2. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/.
3. Шубов Л.Я. Технология твердых бытовых отходов / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник. М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011. 400 с.
4. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 104 с.
5. Wilson R.J. Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes / R.J. Wilson, T.J. Veasey, D.M. Squires // Minerals Engineering. 1994. № 7. P. 975-984.
6. Lungu M. Eddy-current separation of small nonferrous particles by a single-disk separator with permanent magnets / M. Lungu, P. Rem // IEEE Transactions on Magnetics. 2003. № 39 (4). P. 2062-2067. Doi:10.1109/tmag.2003.812724.
7. Settimo F. Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams /

F. Settimo, P. Belivacqua, P. Rem // Physical Separation in Science and Engineering. 2004. Vol. 13. № 1. P. 15-23. Doi: 10.1080/00207390410001710726.

8. **Smith Y.R.** Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review / Y.R. Smith, J.R. Nagel, R.K. Rajamani // Minerals Engineering. 2019. № 133. P. 149-159. Doi: 10.1016/j.mineng.2018.12.025.

9. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, А.Ю. Коняев и др. // Промышленная энергетика. 2001. № 6. С. 16-19.

10. **Коняев А.Ю.** Сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых коммунальных отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, И.А. Коняев // Твердые бытовые отходы. 2017. № 3. С. 36-39.

11. Особенности электродинамической сепарации мелкой фракции твердых бытовых отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев // Экология и

промышленность России. 2017. Т. 21. № 6. С. 4-9.

12. **Колычев Н.А.** Оптимизация обращения с твердыми бытовыми и близкими к ним по составу промышленными отходами в крупных и средних населенных пунктах России / Н.А. Колычев // Биосфера: междисциплинарный научный и прикладной журнал. 2013. Т. 5. № 4. С. 393-418.

13. **Коняев А.Ю.** Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Электротехника. 1998. № 5. С. 52-57.

14. Применение линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями в электродинамических сепараторах / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, М.Е. Зязев // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 22-37.

Зязев Михаил Евгеньевич – аспирант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Коняев Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Гиззатуллин Эльмир Вилевич – магистрант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Mikhail E Zyazev – Postgraduate, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Andrey Yu Konyaev – Dr.Sc. (Tech.), Professor, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Elmir V. Gizatullin – Master student, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Статья поступила в редакцию 14.07.21, принята к опубликованию 12.08.21

УДК 621.31.042

УТОЧНЕННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРОВ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов, С.А. Нестеров

UPDATED ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF SEPARATORS WITH MAGNETIC FLUIDS FOR NON-MAGNETIC MATERIALS

Yu.B. Kazakov, Yu.I. Stradomsky, V.A. Filippov, S.A. Nesterov

Магнитожидкостная сепарация является перспективным способом разделения смесей немагнитных материалов на фракции по плотности с возможностью электромагнитной регулировки границ сепарации. Точность разделения материалов в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах определяется применяемой конструкцией и режимом работы. Электромагнитные процессы в таких сепараторах недостаточно исследованы, особенно при разделении частиц малых размеров, многокомпонентных и многофракционных смесей частиц разнородных материалов. Не в полной мере рассмотрены вопросы влияния формы немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора сепаратора частицами. В связи с этим является актуальным уточненный электромагнитный анализ электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов с учетом распределения магнитного поля и влияния гидродинамических свойств магнитной жидкости на движение частиц в зоне разделения. Для достижения цели используются численные методы анализа электромагнитных процессов в магнитожидкостных сепараторах. Полученные результаты позволяют разрабатывать усовершенствованные конструкции электромагнитных сепараторов с повышенной точностью сепарации.

Ключевые слова: сепарация немагнитных материалов, магнитная жидкость, электромагнитный магнитожидкостный сепаратор, уточненный электромагнитный анализ

Magnetic fluids separation is a promising method for separating mixtures of non-magnetic materials into density fractions with a possibility for electromagnetic separation control. The accuracy of material separation in electromagnetic magnetic fluid separators is determined by their design and operating mode. Electromagnetic processes in such separators have not been sufficiently studied, especially when separating small particles, multicomponent and multifractional mixtures of particles of dissimilar materials. The issues relating the influence of the shape of non-magnetic particles, the degree of filling the working gap of the separator with particles are not fully considered. In this regard, an updated electromagnetic analysis of electromagnetic magnetic fluid separators of non-magnetic materials, taking into account the distribution of the magnetic field and the influence of hydrodynamic properties of the magnetic fluid on the movement of particles in the separation zone is urgent. To achieve this goal, numerical methods for analyzing electromagnetic processes in magnetic fluids separators are used. The results obtained make it possible to develop improved designs of electromagnetic separators with enhanced separation accuracy.

Keywords: separation of non-magnetic materials, magnetic fluid, electromagnetic magnetic fluid separator, updated electromagnetic analysis

Введение

Развитие производства и потребления товаров приводит к увеличению бытовых и промышленных отходов. Многие современные изделия разрабатываются на срок функционирования, совпадающий со сроком гарантии. Производителям часто выгоднее изготовить новое изделие, чем заниматься переработкой устаревших изделий. В то же время эффективная сортировка отходов и извлечение фракций материалов, пригодных для вторичного использования, снижает загрязнение окружающей среды, сохраняет природные ресурсы [1-3]. Совершенствование технологий утилизации и промышленной переработки отходов - важнейшая эколого-экономическая задача. В РФ принята стратегия по переработке отходов промышленного производства на период до 2030 года [4]. В стратегии развитие научно-исследовательских и опытно-конструкторских инновационных

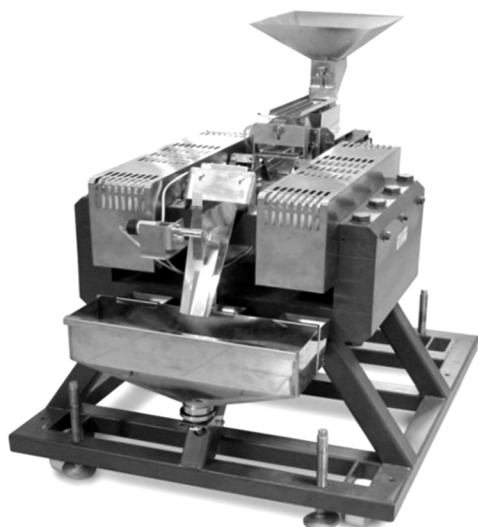


Рис. 1. Электромагнитный магнитожидкостный сепаратор

МЖ в ЭМЖС удерживается между возбужденными полюсами электромагнита в зазоре. МЖ стремится втянуться в зону максимальной напряженности магнитного поля H_{max} , возникает действующая на нее магнитная сила и т. н. «псевдоутяжеление» МЖ. При увеличении магнитной проницаемости МЖ и градиента напряженности ∇H

технологий утилизации отходов объявлены приоритетным направлением.

Перспективной технологией сортировки твердых немагнитных материалов является их разделение в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах (ЭМЖС) [5] (рис. 1). ЭМЖС содержит магнитопровод с обмоткой возбуждения и магнитную жидкость (МЖ) в зазоре электромагнита. МЖ – устойчивый жидкий коллоид в составе жидкости-носителя (вода, масла, фторорганика) и наноразмерных (10-40 нм) ферромагнитных частиц, покрытых поверхностно-активным веществом [2] (рис. 2). Чем выше концентрация магнитных частиц в МЖ, тем сильнее она проявляет магнитные свойства, выше ее магнитная проницаемость $\mu_{ж}$, нелинейнее магнитная характеристика. Применяют МЖ с плотностью $\rho_{ж} = (1,0 \div 1,5) \text{ г/см}^3$, относительной магнитной проницаемостью $1.05 \div 2$, намагниченностью насыщения $M_s = (10 \div 40) \text{ кА/м}$.

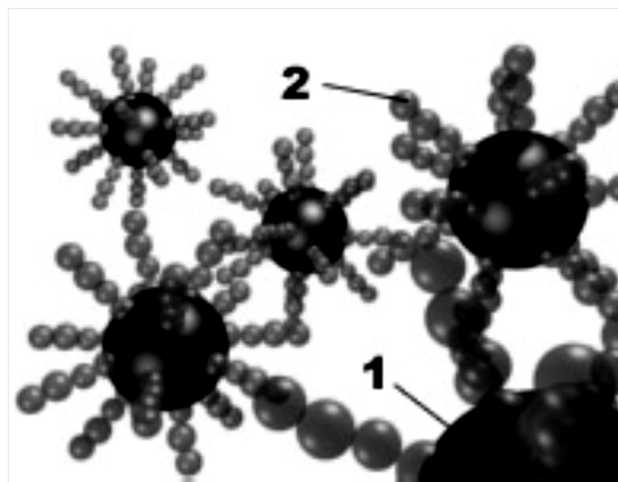


Рис. 2. Магнитная жидкость содержит ферромагнитные частицы (1), покрытые поверхностно-активным веществом (2), в жидкости-носителе

усиливается степень «псевдоутяжеления» МЖ. При погружении в МЖ немагнитной частицы на него будет действовать выталкивающая из МЖ по аналогии с силой Архимеда F_a сила магнитной сепарации F_s . Изменением тока возбуждающей обмотки $I_{в}$ возможно бесконтактным электромагнитным путем изменять в зазоре H , ∇H , степень

«псевдоутяжеления» МЖ, F_c и, соответственно, порог плотности материалов при регулировке сепарации немагнитных частиц. Управляемые ЭМЖС способны сортировать смеси частиц на фракции при плотностях ρ_c от 1,5 до 20 г/см³ в ЭМЖС. Отличие электропроводящих свойств частиц не влияет на точность их сепарации, нет обязательности к одинаковой крупности частиц.

Опыт исследований и эксплуатации сепараторов показывает, что их целесообразно применять при обогащении природных ископаемых и минерального сырья; для проведения фракционного экспресс-анализа материалов; при выделения свободного золота из шлиховых россыпей и доводки алмазосодержащих руд; при отбраковке изделий по плотности; для сепарации дробленого автомобильного и кабельного лома, лома бытовой техники, электротехнического и электронного оборудования при выделении цветных металлов [6-13]. Это имеет большой экономический эффект, так как стоимость только цветных металлов, содержащихся в 40 млн т ежегодного электронного десятков лома в мире, достигает миллиарда долларов.

Перспективные свойства ЭМЖС вызывают повышенный интерес к ним. Но используемые образцы ЭМЖС не отвечают современным требованиям по функциональности, производительности и точности сепарации. Электромагнитные процессы в ЭМЖС недостаточно исследованы при разделении частиц малых размеров, многокомпонентных и многофракционных смесей частиц разнородных материалов. Не в полной мере рассмотрены вопросы влияния формы немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора ЭМЖС частицами. В целом недостаточное исследование ЭМЖС технологического назначения сдерживает их практическое применение. В связи с этим уточненный электромагнитный анализ электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов является актуальным.

Моделирование

По схеме работы ЭМЖС [14] (рис. 3) с лотка подается немагнитная частица объемом V_c с начальной скоростью \bar{v}_0 . Частица попадает в МЖ с вязкостью η (для сепарации обычно используют маловязкие МЖ). В продольном направлении полюсные наконечники электромагнита ЭМЖС длинной активной части полюсов L наклонены под углом α к горизонту, так чтобы легкие частицы скатывались по поверхности МЖ из зоны сепарации.

В МЖ на частицу действуют:

– сила тяжести

$$\bar{F}_T = \rho_c \bar{g} V_c, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения;

– сила Архимеда

$$\bar{F}_A = \rho_{жс} \bar{g} V_c; \quad (2)$$

– сила вязкостного сопротивления движению частицы диаметром d в МЖ

$$\bar{F}_B = -3\pi\eta d_c \bar{v}; \quad (3)$$

– сила магнитной сепарации

$$\bar{F}_C = -\mu_0 M_s V_c \nabla \bar{H} = -M_s V_c \nabla \bar{B}. \quad (4)$$

Вертикальная удельная сила магнитной сепарации

$$\begin{aligned} \frac{\bar{F}_C}{V_c} &= f_m = g(\rho_c - \rho_{жс}) = \\ &= \mu_0 M_s \frac{\partial H}{\partial y} = M_s \frac{\partial B}{\partial y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Немагнитная частица всплывает на поверхность МЖ при выполнении в статике условия

$$\begin{aligned} \bar{F}_C + \bar{F}_A &> \bar{F}_T \\ \text{или } \mu_0 \frac{\partial H}{\partial y} &= \frac{\partial B}{\partial y} > \frac{\rho_c - \rho_{жс}}{M_s}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\partial B/\partial y$ – составляющая градиента магнитной индукции по вертикальной оси.

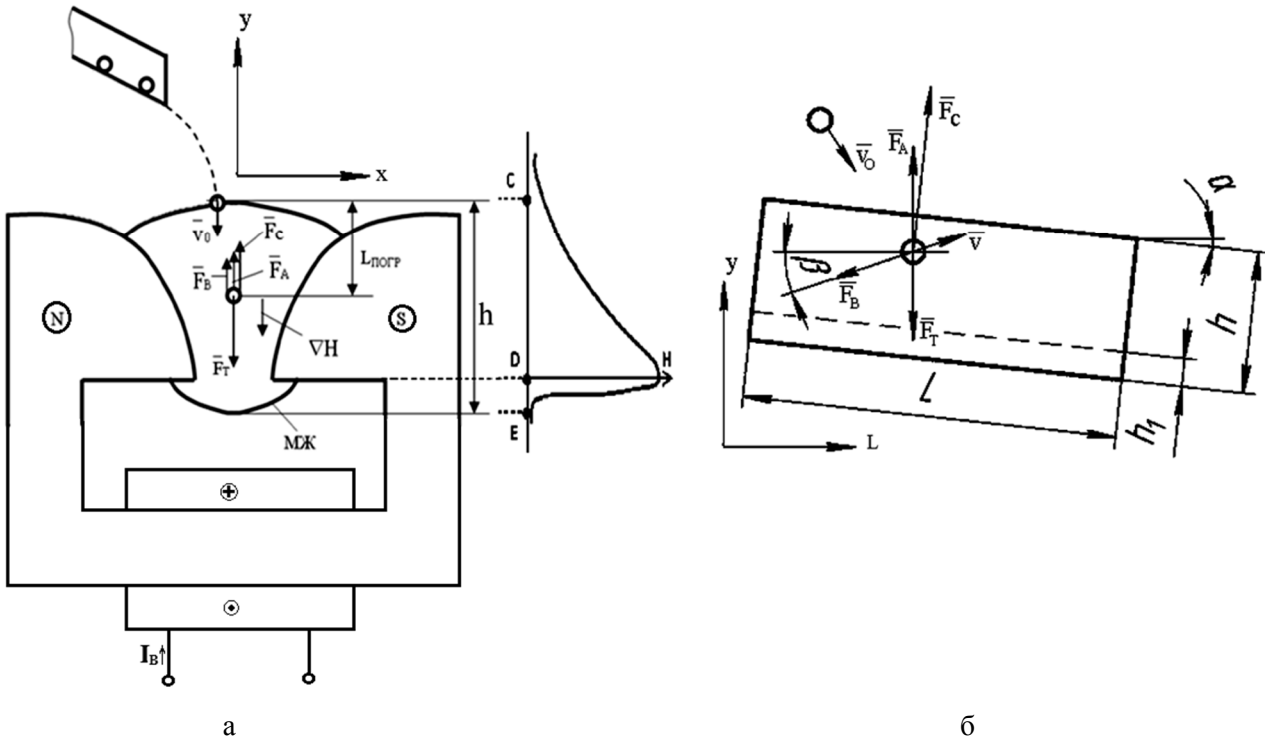


Рис. 3. Схема работы ЭМЖС в поперечном (а) и продольном (б) сечениях

Немагнитная частица выпадает из МЖ при невыполнении условия (6).

Таким образом, при заданных M_S , ρ_c и $\rho_{ж}$ требуемое для сепарации значение $\partial B / \partial y$ определяется величиной $g(\rho_c - \rho_{ж})$.

На линии D в магнитной жидкости высотой столба h (рис. 3 а) $\partial B / \partial y$ меняет знак, поэтому будет меняться направление \vec{F}_C . На участке CD \vec{F}_C способствует всплытию немагнитной частицы. На участке DE (высота расположения минимального зазора относительно нижней поверхности МЖ h_1) \vec{F}_C способствует погружению частицы и выпадению ее из МЖ. Направление \vec{F}_C определяется вектором ∇H , поэтому \vec{F}_C не всегда направлена по оси y (рис. 3 б).

Магнитная жидкость удерживается в зазоре магнитным полем электромагнита. Высота столба h , удерживаемой МЖ (рис. 3 а), определяется из равенства удельных энергий МЖ в гравитационном и магнитном полях

$$\rho_{ж} g h = \mu_0 \int_0^h M_S dH. \quad (7)$$

Форма поверхности МЖ определяется распределением магнитного поля и поверхностным натяжением жидкости. МЖ располагается по линии равной напряженности магнитного поля. Поэтому рассчитывается магнитное поле, находятся линии равной напряженности в зонах С и Е и по заданному объему МЖ определяется ее положение и форма.

Для точного разделения частиц по плотности должно оставаться $\vec{F}_C = \text{const}$ по высоте столба МЖ на участке CD, т.е. должно сохраняться условие $\nabla \vec{B} = \text{const}$. Это обеспечивается соответствующим выбором минимального зазора и формы поверхностей полюсных наконечников (рис. 4). Минимальная ширина зазора $2x_{no}$ должна превышать максимальный диаметр «тяжелых» немагнитных частиц $d_{ч, \text{max}}$, которые будут проходить сквозь зону сепарации. Форма поверхностей наконечника рассчитывается для заданной интенсивности поля. Если по условиям сепарации требуется обеспечение максимальной индукции (в минимальном зазоре) в диапазоне $B_{\text{max } x_{no}} = (0,7-1,0)$ Тл и минимальной индукции (в максимальном зазоре) – $B_{\text{min}} = 0,4$ Тл, то в таких полях МЖ

находится в магнитном насыщении и ее намагниченность составляет $M = M_s$. В предположении горизонтальных линий равной напряженности между точками на поверхности полюсных наконечников с одинаковой вертикальной координатой (рис. 4) зазор x_n на высоте y_n определяется соотношением

$$x_n = x_{no} \frac{1}{1 - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{(y_n - y_{no})}{H_{no}}} = x_{no} \frac{1}{1 - \frac{g(\rho_u - \rho_{жс})}{\mu_0 M_s} \frac{(y_n - y_{no})}{H_{no}}}. \quad (8)$$

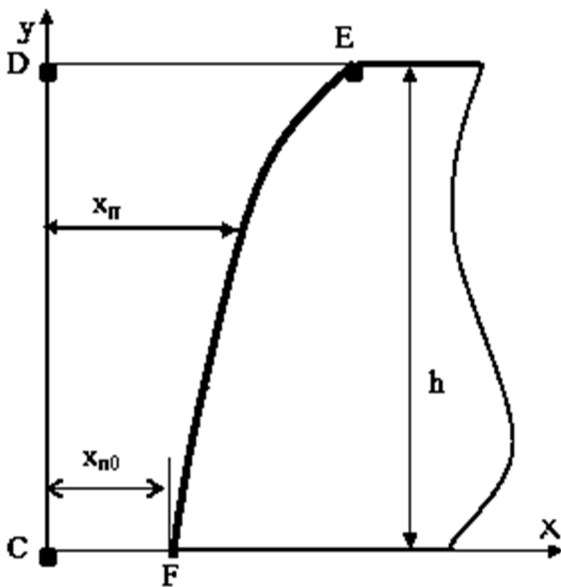


Рис. 4. Профиль полюсов ЭМЖД, обеспечивающих постоянство F_C

Обозначим

$$A = \frac{g(\rho_u - \rho_{жс})}{M_s B_{max}}, \quad (9)$$

тогда

$$x_n = x_{no} \frac{1}{1 - A(y_n - y_{no})}. \quad (10)$$

Такое формирование наконечников полюсов сепаратора, заданные A и x_{n0} позволяют определить высоту зоны сепарации в зазоре $h_C = h - h_1$ (рис. 3) – зону, где сила

сепарации немагнитной частицы из МЖ F_C постоянна.

Процесс движения немагнитной частицы в МЖ, условие всплытия или погружения частицы в МЖ определяются из уравнения векторной суммы сил

$$\frac{dv}{dt} \rho_u V_u + 3\pi \eta v d_u = g(\rho_u - \rho_{жс}) V_u - \mu_0 M V_u \nabla H. \quad (11)$$

Из (11) получены соотношения для времени t_{noz} и уровня h_{noz} погружения частицы. По значениям h_{noz} , зависящей от A , определяется форма профиля наконечников полюсов ЭМЖС, минимальный зазор и др.

Магнитная проницаемость МЖ $\mu_{жс}$ больше магнитной проницаемости немагнитной частицы. В связи с этим, помещение немагнитной частицы в МЖ приводит к перераспределению магнитного поля полюсов электромагнита. Поэтому величина объема V_u и форма немагнитной частицы будут влиять на величину \bar{F}_C . Очевидно, что точность расчета сепарации определяется точностью расчета силы магнитной сепарации \bar{F}_C и, следовательно, точностью расчета магнитного поля и $\nabla \bar{H}$. Для повышения точности расчета сепарации проводилось конечно-элементное моделирование магнитных полей в ЭМЖС, затем избыточных давлений и сил на немагнитные частицы. Численный расчет двумерного магнитного поля выполнялся в системах ELCUT и Ansys Maxwell. Использовались неоднородные конечно-элементные сетки с размерами элементов много меньше размеров немагнитных частиц, но крупнее нанодисперсных магнитных частиц МЖ. Распределение избыточных давлений на частицы определялось по результатам анализа магнитных полей, программно экспортированных в систему MS Excel,

Анализ результатов

Наибольшее требуемое значение $\partial B / \partial y$ можно оценить по (6) из условия всплытия из МЖ на поверхность наиболее плотных частиц, например, золота с $\rho_u \approx 20 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

При использовании МЖ с $M_s = 20$ кА/м и $\rho_{жс} \approx 10^3$ кг/м³ $\partial V/\partial u$ должно составить 9,5 Тл/м. Анализ показывает, что это требование достижимо в рассматриваемых конструкциях. Также определено, что для удовлетворительной сепарации целесообразно выбирать такие M_s и H , чтобы рассчитанная по (7) h составляла (0,05÷0,1) м.

Диапазоны изменения величин при сепарации могут составлять: различие плотностей частиц металлов ρ_c (от алюминия до свинца) с плотностью МЖ –

$(\rho_c - \rho_{жс}) = 4000 \div 12000$ кг/м³; используются МЖ с $M_s = 10 \div 40$ кА/м; максимальная индукция в минимальном зазоре $B_{\max} = 0,4 \div 1$ Тл. В этом случае рассчитанные значения A по (9) составляют $1 \div 30$ м⁻¹. Рассчитанные по (10) соотношения координат поверхностей полюсных наконечников для разных значений A представлены на рис. 5. Формирование таких поверхностей полюсов обеспечивает $F_{\text{ВЫГ}} \approx \text{const}$ с погрешностью не более 5 %.

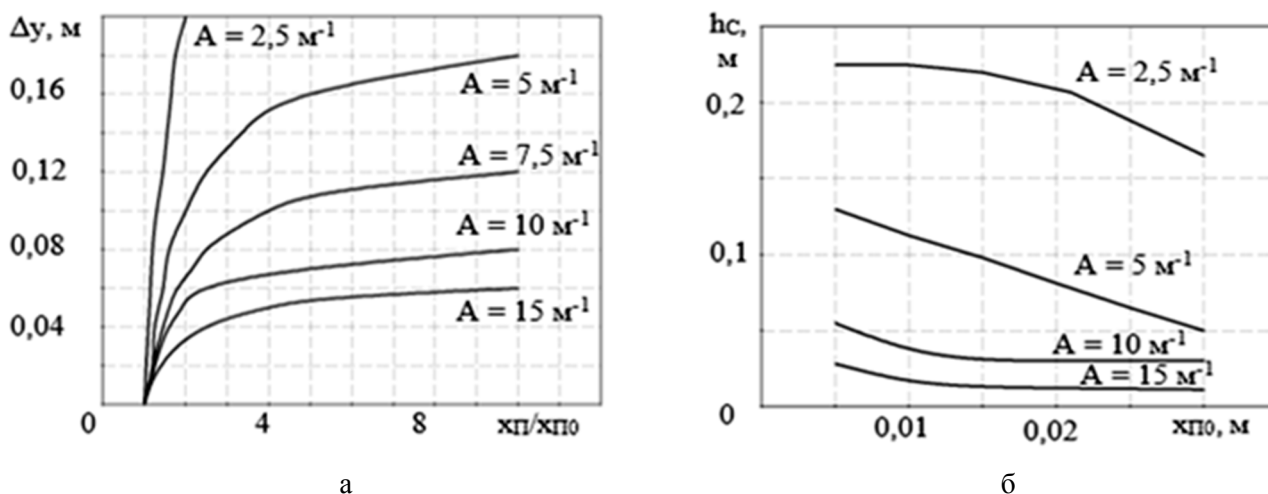


Рис. 5. Необходимые соотношения координат поверхностей полюсных наконечников (а) и изменения высоты зоны сепарации ЭМЖС при разных значениях A

На рис. 6 представлены зависимости глубины погружения немагнитной частицы в МЖ от параметра A . Рабочая часть столба магнитной жидкости $h_p = h_c$ определяется и точкой пересечения графиков магнитной и гравитационной энергий. Зависимости h_p от A и минимального зазора x_{n0} представлены на рис. 7.

По результатам расчетов в программе [15] для заданной v_0 частицы установлены диапазоны возрастания глубины ее погружения в МЖ с повышением плотности частицы. Частица с большей кинетической энергией при входе в МЖ может проскочить зону сепарации (участок CD). Это может приводить к снижению точности сепарации (в тяжелую фракцию будут попадать частицы легкой фракции). При уменьшении градиента напря-

женности в 3 раза для частиц легкой фракции время движения возрастает в 2-6 раз за счет снижения магнитной силы сепарации и возрастания глубины погружения. Снижение плотности частиц в 4 раза увеличивает время их движения частиц на 20 %. Снижение диаметра частиц уменьшает глубину погружения, силу вязкого сопротивления и время движения. При изменении формы частицы изменяется траектория движения частиц. Результаты расчета магнитного поля в зазоре ЭМЖС с присутствием в МЖ немагнитной частицы представлены на рис. 8. Очевидно, что наличие немагнитной частицы вызывает перераспределение магнитного поля, увеличение размеров частицы снижает максимальную напряженность магнитного поля.

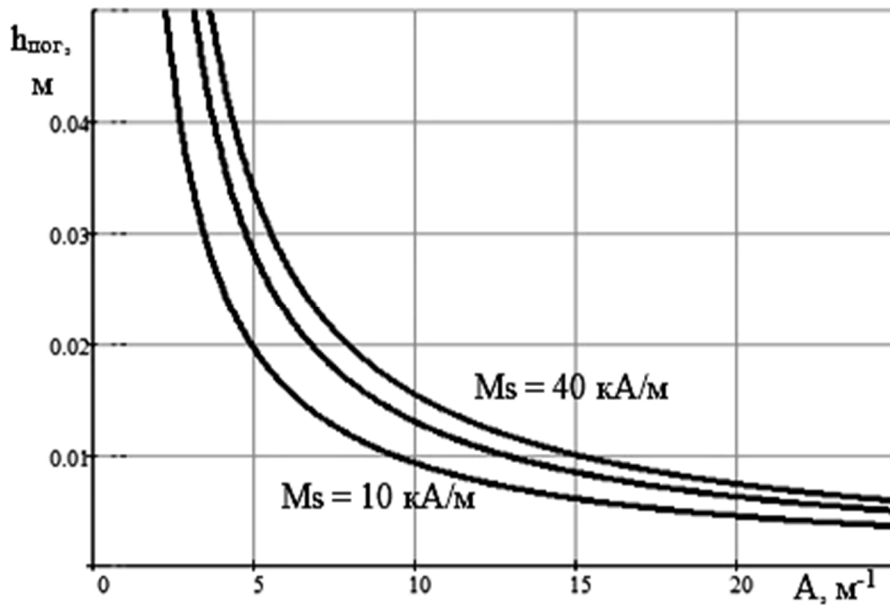


Рис. 6. Глубина погружения немагнитной частицы в зависимости от значений A и M_s

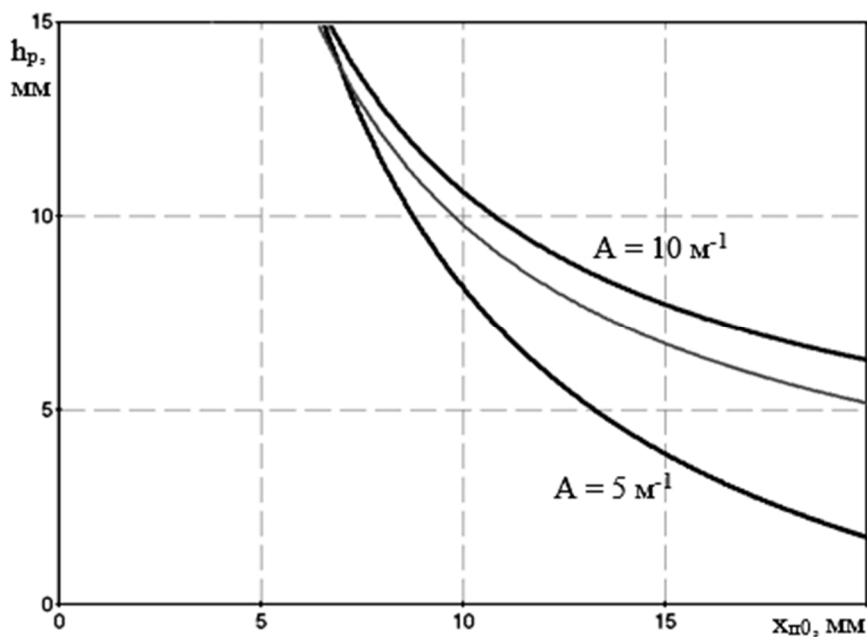


Рис. 7. Зависимость высоты рабочей зоны сепарации от минимального зазора при разных A

Анализ результатов показал, что H меняется линейно с изменением высоты зазора и градиент напряженности постоянен. Так как $H > 230 \text{ кА/м}$, то МЖ находится в состоянии насыщения и ее намагниченность $M = M_s = \text{const}$. Следовательно, распределение магнитного поля в зазоре в ЭМЖС при таком формировании поверхностей полюсных наконечников удовлетворяет условиям сепарации.

Распределение изобар избыточного

давления $\Delta p = p - p_0$ в МЖ в присутствии немагнитной частицы $6 \times 9 \text{ мм}^2$ показано на рис. 9. На рис. 10 приведено распределение Δp по оси x на различных координатах y МЖ по нижней и верхней границам немагнитной квадратной частицы. Очевидно различие давлений по границам частицы и возникновение дополнительной выталкивающей силы F_c как разницы давлений. На рис. 11 и в таблице приведены зависимости изменения удельной силы f_m от V_c .

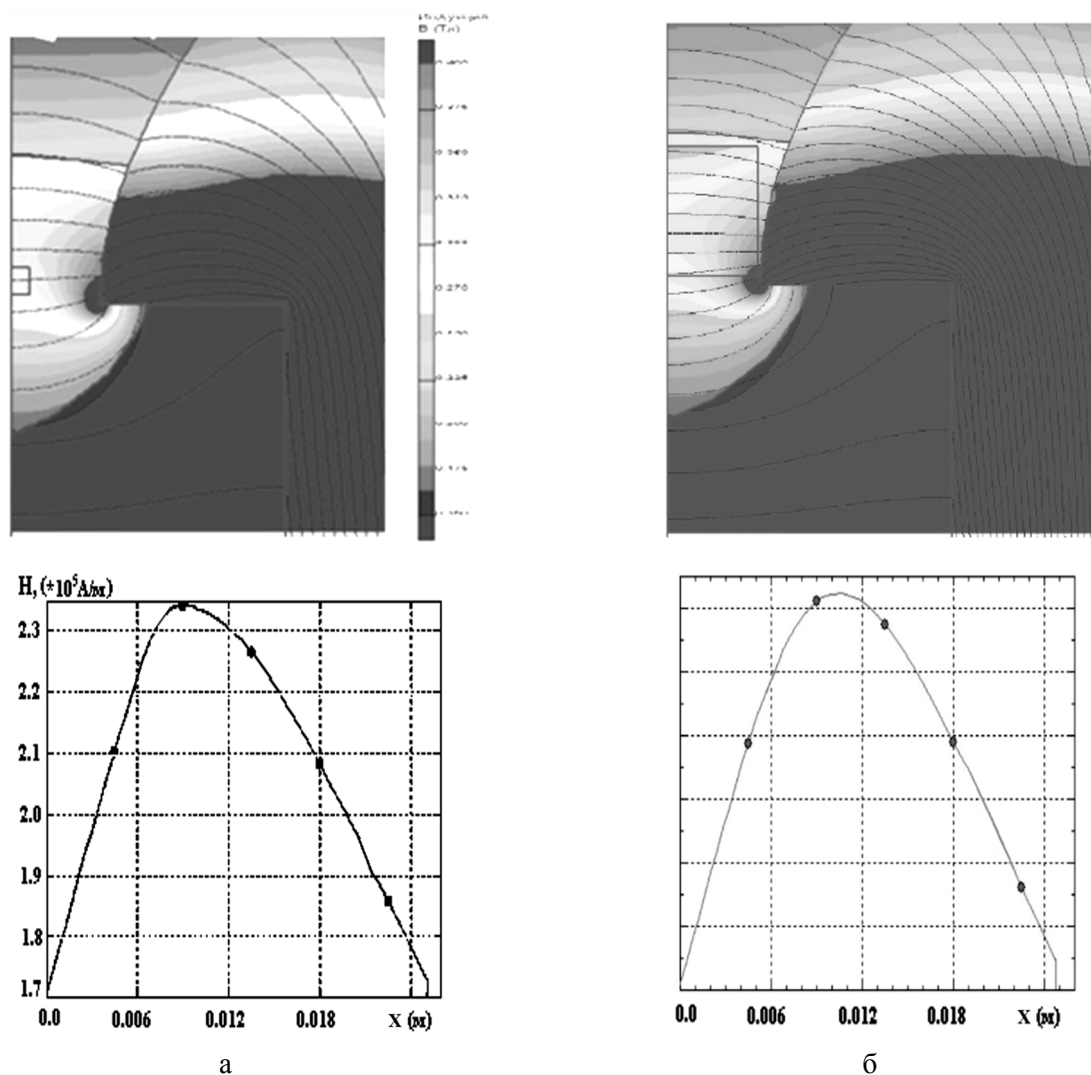


Рис. 8. Распределение линии магнитного потока и изменение H по y в ЭМЖС с квадратной немагнитной частицей малых (а) и увеличенных размеров (б)

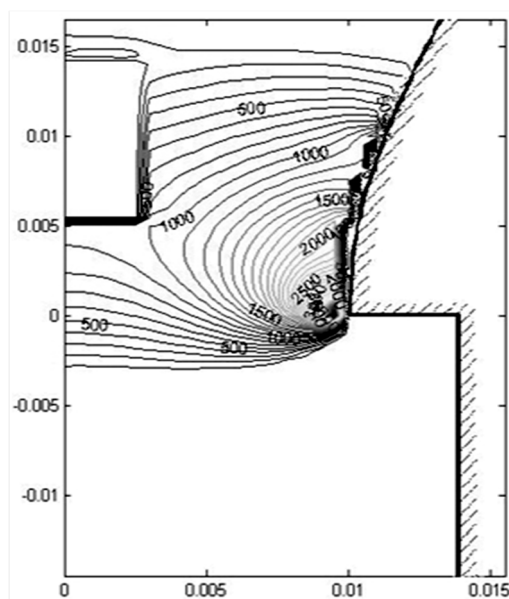


Рис. 9. Распределение $\Delta\rho$ в МЖ с немагнитной частицей $6 \times 9 \text{ мм}^2$

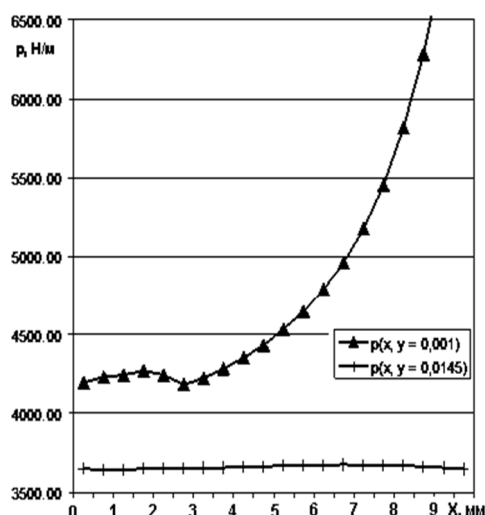


Рис. 10. Изменение давлений по x для нижней и верхней границ немагнитной частицы

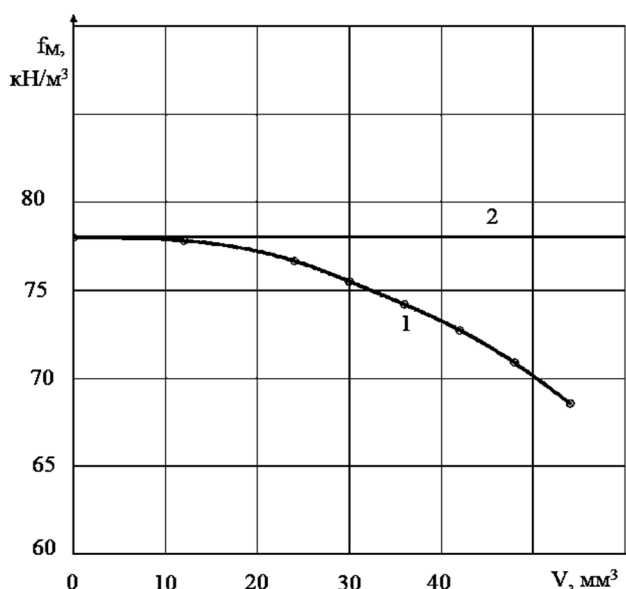


Рис. 11. Изменение f_m от V_v : 1 – с учетом перераспределения B ; 2 – без учета перераспределения B

Зависимость f_m от объема немагнитной частицы

$V_v, \text{мм}^3$	24	30	36	42	48	54
$V_v/V_{\text{мжс}}, \%$	6,2	8	9,3	11	12,4	14
$f_m, \text{кН/м}^3$ (с учетом перераспределения B)	76,67	75,19	74,06	72,74	70,88	68,59
$\Delta f_m, \%$	0	-1,9	-3,4	-5,1	-7,5	-10,5

Возрастание заполнения зоны сепарации частицами немагнитных материалов уменьшает градиент напряженности магнитного поля и силы сепарации. Для сферической частицы с $d_v/2 = 0,9 x_{no}$ уменьшение F_C достигает 15 %, по сравнению с частицей с $d_v/2 = 0,1 x_{no}$. Если при том же объеме форму

сферической частицы изменить на дисковую, то снижение F_C достигает (5-7) %. Если При зона сепарации на 49 % заполнена частицами немагнитных материалов, то сила сепарации уменьшается до 34 %.

Проверка расчетных результатов выполнена путем сравнения опытов на физи-

ческой модели ЭМЖС [16]. Применялась рассчитанная по (10) форма поверхностей полюсных наконечников. Использовалась МЖ с $M_s = 17$ кА/м. Высота столба МЖ составляла $h = 40$ мм, минимальный зазор между полюсными наконечниками – $\delta_{мин} = 2 x_{по} = 19,5$ мм. Изменением тока электромагнита I_6 изменялась F_C . Экспериментально выявлено изменение $I_{впогр}$ (при полном погружении в МЖ свинцовой частицы) и $I_{пад}$ (выпадении из МЖ свинцовой частицы) при изменении $d_ч/\delta_{мин}$ (рис. 12). При возрастании отношения $d_ч/\delta_{мин}$ в области частицы снижаются градиент магнитного поля и сила сепарации. Что бы обеспечить прежнее значение силы сепарации требуется повышать I_6 .

На основе анализа результатов расчетов установлено, что на немагнитную частицу с $d_ч = 18$ мм ($d_ч/\delta_{мин} = 0,92$) действует сила сепарации, составляющая 0,87 от магнитной силы, действующую на МЖ такого объема. По экспериментальной зависимости $I_{пад, опыт}$ (рис. 12) определено, что отношение сил $\sim 0,83$. Различие между экспериментальными и расчетными данными не превышает 5%. Это характеризует правильность методики исследований.

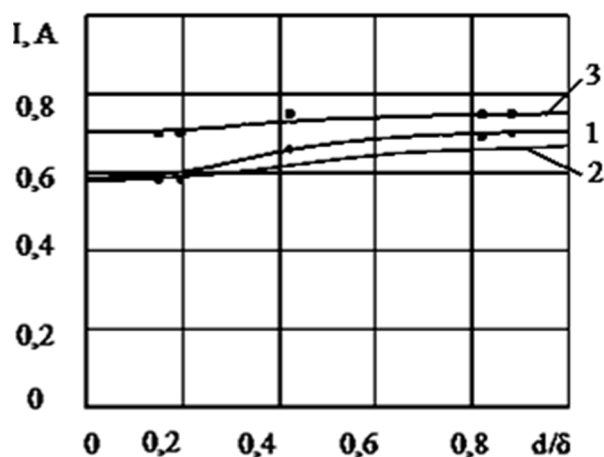


Рис. 12. Изменения токов при изменении d/δ : 1 – $I_{пад, опыт}$; 2 – $I_{пад, расчет}$; 3 – $I_{впогр, опыт}$

Влияние коэффициента заполнения зоны сепарации немагнитными свинцовыми частицами $k = V_ч/V_{МЖ}$ на ток всплытия $I_{вспл}$ приведено на рис. 13. Увеличение k уменьшает интенсивность магнитного поля, силу

сепарации. Это вызывает необходимость повышения I_B для всплытия этих частиц.

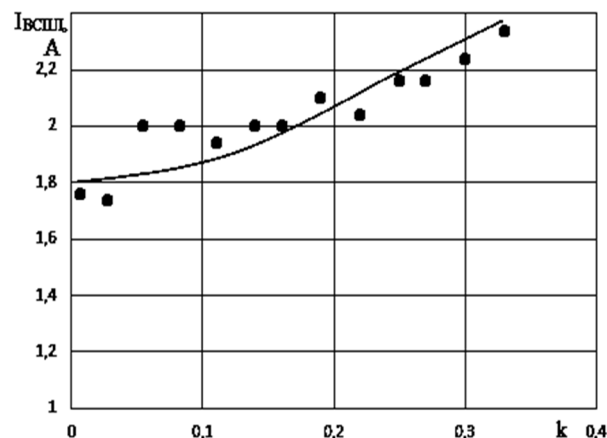


Рис. 13. Влияние коэффициента заполнения зазора ЭМЖС свинцовыми частицами на $I_{вспл}$

На основе результатов исследований запатентована конструкция усовершенствованного электромагнитного магнитожидкостного сепаратора с улучшенными свойствами по точности сепарации и функциональности [17].

Заключение

Разработанная методика уточненного электромагнитного анализа электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных частиц на основе конечно-элементного расчета распределений магнитных полей с учетом их перераспределения при наличии в МЖ немагнитных частиц, нелинейных характеристик намагничивания магнитопровода ЭМЖС и МЖ, немагнитных частиц разных размеров и форм и, степени заполнения немагнитными частицами магнитожидкостной зоны сепарации позволяет повысить точность расчетов давлений и сил сепарации, действующих на частицы немагнитных материалов в МЖ.

Выявлено влияние изменения коэффициента заполнения зазора немагнитными частицами, отклонения формы частиц от сферической, размеров немагнитных частиц на изменение силы сепарации. Изменением тока возбуждения возможно бесконтактным электромагнитным путем изменять порог плотности материалов при регулировке сепарации немагнитных частиц.

Установлено, что для повышения точности сепарации целесообразно увеличение высоты зоны сепарации за счет применения МЖ с большей M_s и/или увеличения интенсивности магнитного поля. Возрастание M_s возможно путем использования МЖ с большей концентрацией магнитной фазы МЖ, но это вызывает возрастание вязкости МЖ, что замедляет процесс сепарации. Увеличение интенсивности магнитного поля возможно возрастанием тока электромагнита.

Предложен расчет формы поверхностей наконечников полюсов электромагнитного

магнит жидкостного сепаратора, который позволяет сформировать требуемое распределение магнитного поля. Это позволяет повысить точность сепарации частиц немагнитных материалов с погрешностью не более 7 %. Экспериментальные исследования подтверждают результаты теоретических исследований с погрешностью не более 8 %.

На основе результатов исследований запатентована конструкция усовершенствованного ЭМЖС повышенной точности сепарации и функциональности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глобальный мониторинг электронных отходов / К.П. Балде, В. Форти, В. Грей, Р. Кюр, П. Стегманн; Университет Организации объединенных наций (УООН), Международный союз электросвязи (МСЭ) и Международная ассоциация по твердым отходам (МАТО), Бонн, Женева, Вена, 2017. 116 с. https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM_2017-R.pdf (дата обращения: 06.05.2021).

2. An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems: REVIEW: End-of-Life Vehicle (ELV) Recycling / Shin-ichi Sakai and etc. // *J Mater Cycles Waste Manag.* 2014. 16:1-20. DOI 10.1007/s10163-013-0173-2.

3. **Dalmijn W.L.** The Development of Vehicle Recycling in Europe: Sorting, Shredding, and Separation / W.L. Dalmijn, T.P.R. De Jong // *JOM.* November 2007. P. 52-56.

4. **Распоряжение Правительства РФ** от 25.01.2018 № 84-р «Об утверждении стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года».

5. Промышленные сепараторы на магнитных жидкостях / В.В. Гогосов, Р.Д. Смолкин, В.С. Крохмаль и др. // *Магнитная гидродинамика.* 1994. № 1. С. 111-120.

6. Способы переработки электронного лома за рубежом. URL: [www.metal-archive.ru/metallurgiya-zolota-i-serebra/2611-sposoby-pererabotki-elektronnogo-loma-za-](http://www.metal-archive.ru/metallurgiya-zolota-i-serebra/2611-sposoby-pererabotki-elektronnogo-loma-za-rubezhom.html)

rubezhom.html (дата обращения: 06.05.2021).

7. Извлечение цветных и благородных металлов из электронного лома: экономические показатели и стратегия ценообразования / Л.С. Стрижко, Ю.Ю. Костюхин, Г.В. Кружкова, Е.А. Иванова // *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2013. № 3. С. 28-33.

8. **Баркан М.** Технология извлечения драгоценных металлов из отходов электротехники / М. Баркан, М. Чиненкова. URL: www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=233 (дата обращения: 06.05.2021).

9. Separation technology. URL: www.cogelme.com (дата обращения: 06.05.2021).

10. **Пелевин А.Е.** Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения: учебник / А.Е. Пелевин; Урал. гос. горный ун-т. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. 296 с.

11. **Коняев А.Ю.** Исследование процессов электродинамической сепарации электронного лома / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, Н.С. Якушев // *Экология и промышленность России.* 2015. Т. 19. № 4. С. 15-19.

12. **Коняев А.Ю.** Сепараторы для извлечения цветных металлов из ТКО / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, И.А. Коняев // *Твердые бытовые отходы.* 2017. № 3 (129). С. 36-39.

13. Non-ferrous metal separator. URL: www.steinert.de (дата обращения: 05.10.2020).

14. **Казаков Ю.Б.** Моделирование и исследование электротехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов // Вестник ИГЭУ. 2011. № 2. С. 54-57.

15. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019616505 «Расчет траекторий немагнитных частиц в зоне разделения магнито-жидкостного сепаратора» / В.А. Филиппов // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.05.2019 г.

16. **Kazakov Yu.B.** Calculation of the performance of the electromagnetic magnetic fluid separator non-magnetic materials / Yu.B. Kazakov, V.A. Filippov // Advanced Problems of Electrotechnology: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. October 1-2, 2020. Yekaterinburg, Russian Federation. 2020. Vol. 950. № 012003. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/950/1/012003.

17. Патент на изобретение № 2464101. Магнитогидростатический сепаратор / Ю.И. Страдомский, Ю.Б. Казаков, В.А. Филиппов. Зарегистр. в Гос. реестре изобретений РФ 20.10.2012 г. Опубл. 10.10.2012 // Бюл. № 28.

Казаков Юрий Борисович - доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ, заведующий кафедрой «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Страдомский Юрий Иосифович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Филиппов Василий Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Нестеров Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Yuri B. Kazakov – Dr.Sc. Tech., Professor, Full Member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Head: Department of Electromechanics, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

Yuri I. Stradomsky – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

Vasily A. Filippov – PhD (Technical Sciences), Senior Lecturer, Department of Electromechanics Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

Sergei A. Nesterov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

Статья поступила в редакцию 14.07.21, принята к опубликованию 12.08.21

УДК 621.793.71, 621.365.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОКА ИНДУКТОРА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Е.О. Осипова, О.А. Маркелова, В.А. Кошуро, А.А. Фомин

EFFECTS OF INDUCTOR CURRENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMAL SPRAY COATINGS ON TITANIUM

E.O. Osipova, O.A. Markelova, V.A. Koshuro, A.A. Fomin

В статье рассматривается процесс индукционно-термической модификации титановых покрытий, сформированных на титановых образцах методом электроплазменного напыления. Экспериментально установлено влияние тока индуктора в диапазоне от 3,5 до 8,0 кА на температуру обрабатываемых образцов. Результаты исследований показали, что при термической модификации в воздушной среде происходило изменение структуры и механических свойств титановых покрытий. Установлено, что с увеличением температуры нагрева увеличилась пористость с 56 ± 2 до 61 ± 1 %, толщина слоя снизилась с 320 ± 30 до 114 ± 15 мкм. За счет изменения структуры материала покрытия при окислении увеличилась микротвердость с 1035-1532 до 1825-1883 $HV_{0,98}$ в зависимости от тока индуктора и температуры обработки. Микротвердость подложки также увеличивается с изменением температуры обработки со 145 до 442 $HV_{0,98}$.

Ключевые слова: индукционно-термическая обработка, электроплазменное напыление, титан, микротвердость, покрытие

Введение

Конструкции восстановительной медицины зачастую производятся из сплавов на основе титана [1]. Для улучшения качества остеоинтеграции поверхность титанового имплантата подвергают модификации (тек-

The article considers the induction heating modification technique of titanium coatings formed on titanium samples using electroplasma spraying methodology. The influence of inductor current in the range 3.5 to 8.0 kA on the temperature of the processed samples has been established experimentally. The research results showed that the structure and mechanical properties of titanium coatings change under thermal modification in the aerial environment. It was found that with an increase in the heating temperature, the porosity increased from 56 ± 2 to 61 ± 1 %, whereas the layer thickness decreased from 320 ± 30 to 114 ± 15 μm . Due to the change in the structure of the coating material during oxidation, the microhardness increased from 1035-1532 to 1825-1883 $HV_{0,98}$, depending on the inductor current and processing temperature. The microhardness of the substrate also increases with a change in the processing temperature from 145 to 442 $HV_{0,98}$.

Keywords: induction thermal treatment, electroplasma spraying, titanium, microhardness, coating

стурированию) или формируют покрытие, например титановое, которое по структуре подобно костной ткани. При этом нанесенные биосовместимые слои должны характеризоваться высокой адгезионно-когезионной прочностью [2, 3].

Покрyтия, формируемые газотермическим напылением, электрохимическим осаждением, вакуумными технологиями осаждения тонких пленок (CVD и PVD), широко применяются в биомедицине, авиастроении, машиностроении [4-6]. Газотермическое напыление отличается высокой производительностью, технологической простотой и поэтому получило широкое распространение в производстве. Титановые покрытия получают газотермическим напылением порошкового материала или распылением проволоки [7-10]. Морфология поверхности и механические характеристики сформированных слоев во многом зависят от технологии и режимов напыления [11-13].

Одним из методов газотермического напыления является электроплазменное напыление (ЭПН), позволяющее формировать титановые покрытия с пористостью 10-50 % и прочностью сцепления покрытия с основой до 20 МПа [14, 15]. Основными недостатками напыленных слоев являются неравномерность элементно-фазового состава, наличие дефектов структуры и остаточных напряжений в напыленном материале, что приводит к разрушению покрытия [16].

Для повышения функциональных свойств плазменных покрытий используются плакированные порошки [17], применяют предварительный индукционный нагрев подложки [18] или различные методы модификации: химическую обработку поверхности [19], электрофизическую, электротермическую или концентрированными потоками энергии [20-22]. При индукционно-термической обработке (ИТО) происходит одновременный нагрев покрытия и подложки. Данный процесс способствует изменению пористости, твердости и, вероятнее всего, адгезионно-когезионной прочности [23, 24]. ИТО позволяет формировать на титане наноструктурные металлооксидные слои, повышающие остеокондуктивные свойства поверхности имплантата [25].

Исследовательских работ, посвященных ИТО напыленных покрытий, недостаточно для дальнейшего развития технологий модификации поверхности. Поэтому цель данной работы заключалась в исследовании

влияния параметров ИТО, в частности тока индуктора и температуры обработки на структуру и твердость титановых покрытий, сформированных методом электроплазменного напыления.

Материалы и методы исследований

Образцы для исследований представляли собой титановые диски диаметром 15 мм и толщиной 0,5 мм. Перед нанесением покрытия поверхность образцов подвергалась абразивно-струйной обработке на установке «Чайка-20» порошком электрокорунда дисперсностью 250-300 мкм при давлении $4 \pm 0,5$ МПа. Очистка образцов от технологических загрязнений проводилась в растворе ПАВ с использованием ультразвуковой ванны «УЗУМИ-2». Покрытие формировалось электроплазменным напылением порошка титана марки ПТС дисперсностью 100-150 мкм с использованием установки «УПН-28». Использовались следующие режимы напыления: ток дуги плазмотрона – 350 А (± 1 %); дистанция напыления – 150 ± 10 мм; расход транспортирующего газа – 10 ± 5 л/мин; расход плазмообразующего газа – 25 ± 5 л/мин. ИТО образцов проводилась на установке «ВЧ-15» при постоянной выдержке 300 с и разной величине тока индуктора (см. таблицу).

Соответствие тока индуктора температуре обработки

№	Ток индуктора, кА	Температура, °С
1	3,5	750-800
2	4,8	900-950
3	8,0	1150-1200

Анализ структуры покрытия проводился растровым электронно-микроскопическим методом (РЭМ) с использованием микроскопа «MIRA 2 LMU». Размер структурных элементов, пористость и толщина формируемых слоев определялись по изображениям участков покрытий (ширина кадра 660 мкм) с использованием программы анализа геометрических параметров микрообъектов «Metallograph» [26].

Анализ микротвердости проводили на твердомере «ПМТ-3» при нагрузке на индентор Виккерса, равной 100 гс (ГОСТ 9450-76). Данная нагрузка обеспечивала необходимую визуализацию отпечатков на структурных элементах покрытия – напыленных и закристаллизовавшихся частицах (сплэтах).

Результаты и обсуждение

В ходе плазменного напыления покрытие формировалось из отдельных титановых проплавленных частиц, расположенных послойно и образующих агломераты размером 100-200 мкм (рис. 1 *а*). Визуализировались дефекты покрытия в виде глубоких пор и трещин, характеризуемых суммарной пористостью поверхности $56\pm 2\%$. На поверхности крупных сплэтов были заметны отдельные частицы округлой формы размером до 20 мкм.

Термическая модификация в низкотемпературном диапазоне по 1-му режиму позволила снизить количество трещин.

Уменьшилось также количество отдельных частиц, что привело к возрастанию пористости до $61\pm 1\%$ (рис. 1 *б*). Количество сферических частиц размером менее 5 мкм уменьшилось, в то время как число более крупных частиц величиной 10-50 мкм практически не изменилось. Возрастание температуры модификации до $900-950^\circ\text{C}$ привело к заметному снижению количества пор, трещин и границ раздела структурных составляющих, при этом пористость составила $55\pm 2\%$ (рис. 1 *в*). В структуре поверхности модифицированного покрытия преобладали частицы размером 30-40 мкм. Дальнейшее увеличение тока индуктора, а соответственно, и температуры обработки не привело к существенному изменению пористости, которая осталась равной $56\pm 1\%$. Форма отдельных структурных элементов покрытия изменилась с правильной на вермикулярную и призматическую (рис. 1 *г*). Изменение формы кристаллов на поверхности сплэтов сопровождалось заметным уменьшением доли частиц размером менее 40 мкм.

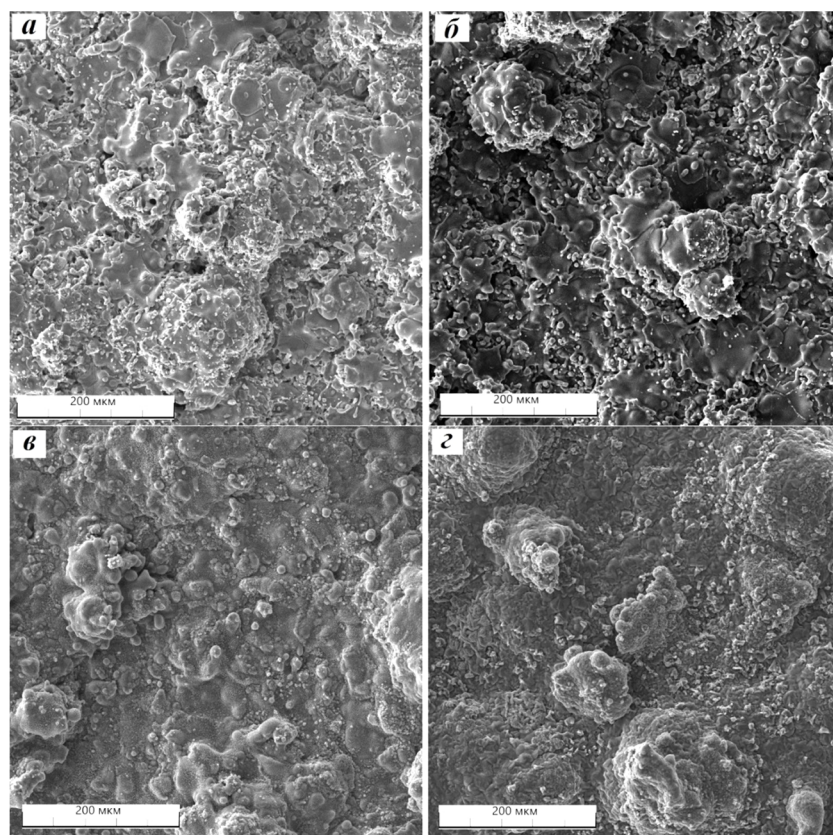


Рис. 1. РЭМ фотографии образцов:

а – плазменное покрытие (без ИТО); *б* – $T = 750-800^\circ\text{C}$; *в* – $T = 900-950^\circ\text{C}$; *г* – $T = 1150-1200^\circ\text{C}$

Толщина исходного слоя, полученного электроплазменным напылением, составила 320 ± 30 мкм. Микроиндентирование показало, что полученная пористая структура характеризовалась твердостью 1035-1530 $HV_{0,98}$ на глубине 200 мкм от границы раздела металл – основа (рис. 2). Микротвердость титановой основы образцов не превышала 145 $HV_{0,98}$. После низкотемпературной модификации покрытия полученный слой подвергся окислению, и его толщина увеличилась до 360 ± 35 мкм. Твердость данного покрытия на глубине 100-150 мкм достигла 1825 $HV_{0,98}$,

а на глубине 25 мкм (близкой к Ti основе) составляла 600 $HV_{0,98}$. Термическая модификация в средне- и высокотемпературном диапазонах привела к уменьшению толщины покрытия до 115 ± 15 мкм и 190 ± 25 мкм и стабилизации микротвердости на уровне 1600 $HV_{0,98}$ и 1885 $HV_{0,98}$ соответственно. После термической обработки при 900-950° C твердость титановой основы возросла до 270 $HV_{0,98}$. При наибольшей температуре ИТО твердость основы образцов достигла 440 $HV_{0,98}$. Изменение твердости связано с окислением и формированием упрочненных диффузионных слоев.

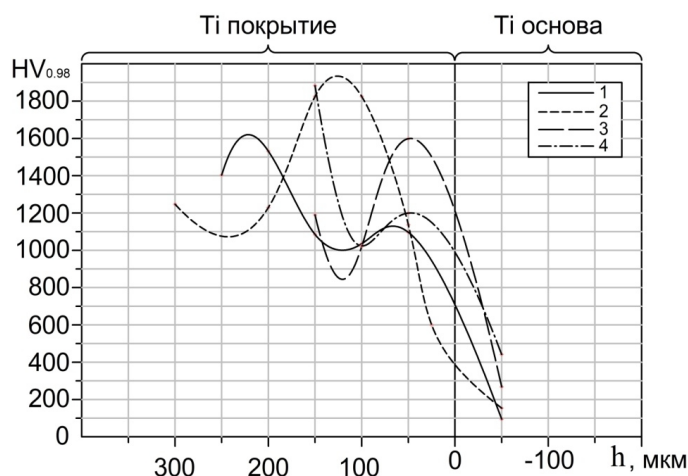


Рис. 2. Распределение микротвердости покрытия по глубине образца:
 1 – ЭПН покрытие; 2 – $T = 750-800^\circ C$; 3 – $T = 900-950^\circ C$; 4 – $T = 1150-1200^\circ C$

Заключение

Таким образом, электроплазменные покрытия обладали высокой суммарной пористостью около $56 \pm 2\%$ при толщине 320 ± 30 мкм. Полученная структура имела высокую микротвердость 1035-1530 $HV_{0,98}$. Твердость титановой основы при данной обработке не превышала 145 $HV_{0,98}$. Низкотемпературная ИТО при токе индуктора 3,5 кА, что соответствовало температуре 750-800° C, способствовала увеличению открытой пористости до $61 \pm 1\%$ и толщины покрытия до 360 ± 35 мкм. Микротвердость данного покрытия составляла 1100-1825 $HV_{0,98}$ и плавно снижалась до 600 $HV_{0,98}$ на границе контактного взаимодействия с титановой основой. Увеличение тока индуктора до 4,8 кА и температуры процесса до 900-950° C привело к снижению пористости до $55 \pm 2\%$. При мак-

симальном значении тока индуктора, равном 8,0 кА, а соответственно и температуры выдержки около 1150-1200° C, существенных изменений пористости не выявлено ($56 \pm 1\%$). Отдельные структурные элементы покрытия приобрели вермикулярную и призматическую формы. Обработка при токе индуктора 4,8-8,0 кА привела к уменьшению толщины покрытия до 114 ± 15 мкм и 186 ± 24 мкм, микротвердость по сечению напыленного материала не превышала 1600-1880 $HV_{0,98}$. Полученные покрытия могут найти применение при изготовлении титановых конструкций для восстановительной медицины.

Статья подготовлена при выполнении научных исследований в рамках гранта Президента Российской Федерации № МД-965.2021.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pohler O.E.M.** Unalloyed titanium for implants in bone surgery / O.E.M. Pohler // *Injury*. 2000. Vol. 31. P. D7-D13.
2. Нанесение электретного покрытия на поверхность титановой ножки эндопротеза тазобедренного сустава / Н.В. Чернюк, К.В. Овчинников, Л.С. Пинчук и др. // *Физика и химия обработки материалов*. 2009. № 1. С. 45-50.
3. **Корнилов Н.Н.** Эндопротезирование коленного сустава / Н.Н. Корнилов, Т.А. Куляба, К.А. Новосёлов. СПб.: Гиппократ, 2006. 463 с.
4. Osteoblastic cell response on high-rough titanium coatings by cold spray / A.M. Vilarde, N. Cinca, N. Garcia-Giralt et al. // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2018. Vol. 29. № 2. P. 1-10.
5. Properties of titanium thin films deposited by DC magnetron sputtering / Y.L. Jeyachandran, B. Karunakaran, S.K. Narayandass et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 431. № 1-2. P. 277-284.
6. Study of Ti deposition onto Al alloy by cold gas spraying / N. Cinca, M. Barbosa, S. Dosta, J.M. Guilemany // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 205. № 4. P. 1096-1102.
7. **Qian M.** Titanium powder metallurgy: science, technology and applications / M. Qian, F.H. Froes // *Butterworth-Heinemann*. 2015. 627 p.
8. A perspective on plasma spray technology / A. Vardelle, C. Moreau, N.J. Themelis, C. Chazelas // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2015. Vol. 35. P. 491-509.
9. **Benea M.L.** Characterisation of the TiO₂ coatings deposited by plasma spraying / M.L. Benea, L.P. Benea // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. Vol. 106. № 1. P. 012024.
10. **Cizek J.** Medicine meets thermal spray technology: A review of patents / J. Cizek, J. Matejcek // *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018. Vol. 27. № 8. P. 1251-1279.
11. Porosity and its significance in plasma-sprayed coatings / J.G. Odhiambo, W. Li, Y. Zhao, C. Li // *Coatings*. 2019. Vol. 9. № 7. P. 460.
12. Structure and shear strength of implants with plasma coatings / V.I. Kalita, A.I. Mamaev, V.A. Mamaeva et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Vol. 7. № 3. P. 376-387.
13. Microstructural investigation of porous titanium coatings, produced by thermal spraying techniques, using plasma atomization and hydride-dehydride powders, for orthopedic implants / P. Gkomoza, G.S. Lampropoulos, M. Vardavoulias et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 357. P. 947-956.
14. Characterization of thick titanium plasma spray coatings on PEEK materials used for medical implants and the influence on the mechanical properties / D. Vogel, H. Dempwolf, A. Baumann, R. Bader // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018. Vol. 77. P. 600-608.
15. Structure and mechanical properties of three-dimensional capillary-porous titanium coatings on intraosteal implants / V.I. Kalita, D.I. Komlev, A.A. Radyuk // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Vol. 7. № 4. P. 536-541.
16. **Кошуро В.А.** Состав и структура покрытия, полученного на титановом сплаве ВТ16 при комбинированной обработке методами электроплазменного напыления и микродугового оксидирования / В.А. Кошуро, Г.Г. Нечаев, А.В. Лясникова // *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84. № 10. С. 153-155.
17. Керамический материал системы «оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка» / В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый // *Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал*. 2011. № 1. С. 16-20.
18. Фазово-структурные и химические превращения на поверхности титана при плазменно-индукционном нанесении биокерамических покрытий / А.А. Фомин, М.А. Фомина, Е.Ю. Пошивалова и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2014. Т. 11. № 3. С. 303-311.

19. In vivo evaluation of plasma-sprayed titanium coating after alkali modification / W. Xue, X. Liu, X. Zheng, C. Ding // *Bio-materials*. 2005. Vol. 26. № 16. P. 3029-3037.

20. Pulsed laser modification of plasma-sprayed coatings: Experimental processing of hydroxyapatite and numerical simulation / S. Dyshlovenko, L. Pawlowski, I. Smurov, V. Veiko // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. № 6. P. 2248-2255.

21. Laser surface modification and characterization of air plasma sprayed alumina coatings / R. Krishnan, S. Dash, R. Kesavamoorthy et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. № 8. P. 2791-2799.

22. Модификация плазменных износостойких покрытий импульсным лазером / В.А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, А.И. Шевцов и др. // *Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал*. 2009. № 4. С. 49-53.

23. **Фролов В.Я.** Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий методом индукционной термообработки / В.Я. Фролов, Е.А. Смирнова, Б.А. Юшин // *Металлообработка*. 2009. № 2. С. 28-33.

24. Структура и микротвердость титановых покрытий на имплантатах после индукционно-термической обработки / А.А. Фомин, В.И. Калита, В.А. Кошуро и др. // *Перспективные материалы*. 2016. № 12. С. 25-37.

25. Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles / A. Fomin, S. Dorozhkin, M. Fomina et al. // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. № 9. P. 10838-10846.

26. Surface morphology data of tantalum coatings obtained by electrospark alloying / M. Fomina, V. Koshuro, V. Papshev et al. // *Data in Brief*. 2018. Vol. 20. P. 1409-1414.

Осипова Елена Олеговна – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Маркелова Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кошуро Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомин Александр Александрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия», проректор по науке и инновациям Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena O. Osipova – Postgraduate, Teaching Assistant Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga A. Markelova – PhD (Technical Sciences), Teaching Assistant, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A. Koshuro – Ph.D (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksander A. Fomin – Dr.Sc. (Tech.), Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Vice Rector for Science and Innovation, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.07.21, принята к опубликованию 12.08.21

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 621.3.048

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Л.Р. Гайнуллина, А.Р. Фасыхов

INFLUENCE OF MECHANICAL IMPURITIES ON DIELECTRIC STRENGTH OF TRANSFORMER OIL

L.R. Gaynullina, A.R. Fasykhov

Изучено влияние механических примесей на электрическую прочность трансформаторного масла ГК. Проведены замеры пробивного напряжения масла ГК и модельных смесей на его основе, содержащих различные концентрации мелкодисперсной меди, стали и волокон целлюлозы. Также для сравнения были проведены испытания на модельных смесях с добавлением воды. Установлено, что модельные смеси, содержащие волокна целлюлозы показали наихудшие значения пробивного напряжения, а соответственно электрической прочности. Электрическая прочность снизилась в 3,7 раза, в то время как в присутствии воды электрическая прочность снизилась в 1,77 раза.

Ключевые слова: трансформаторное масло, механические примеси, электрические характеристики, электрическая прочность, пробивное напряжение

Основной причиной отказов силовых маслонаполненных трансформаторов, являющихся одним из показателей эксплуатационной надежности, является снижение электрической прочности трансформаторного масла [1]. Изоляционные дефекты приносят экономические убытки до 98 % [2]. Поскольку электроэнергетическое оборудование средних и высоких классов напряжения, в том числе трансформаторы,

The influence of mechanical impurities on dielectric strength of HC transformer oil has been studied. The breakdown voltage of HC oil and its model mixtures containing different concentrations of fine copper, steel, and cellulose fibers were measured. The tests using model mixtures with addition of water were carried out for comparison purposes. It was found that the model mixtures containing cellulose fibers showed the worst values of the breakdown voltage and dielectric strength, respectively. The dielectric strength decreased by 3,7 times, while in the presence of water, the dielectric strength decreased by 1,77 times.

Keywords: transformer oil, mechanical impurities, electrical characteristics, dielectric strength, breakdown voltage

является одним из наиболее дорогостоящих и ответственных видов оборудования электрических станций, вопрос повышения электрической прочности трансформаторного масла является актуальным.

Электрическая прочность, характеризующая пробивным напряжением трансформаторного масла, снижается в присутствии эмульгированной влаги и механических примесей. В процессе эксплуатации транс-

форматорного масла в его углеводородных соединениях происходит термохимическая деструкция компонентов, в результате которой образуются продукты старения масла, в том числе механические примеси и вода, причем с повышением температуры масла эмульгированная вода переходит в растворенное состояние. В этом случае помимо осушки масла важно не допускать его резкого охлаждения в процессе эксплуатации [3]. Механические примеси, асфальтовые осадки, мыловые осадки, углистые осадки, коллоидные вещества, волокна целлюлозной изоляции присутствуют в масле на стадии заливки его в оборудование либо образуются в процессе эксплуатации под влиянием повышенных температур и напряженности электрического поля.

При изготовлении масляных трансформаторов применяют различные виды твердых изоляционных материалов – электротехнический картон, кабельная бумага и т.д. Из электротехнического картона изготавливают изоляционные шайбы, прокладки, создают в масле барьеры, повышающие электрическую прочность изоляционных промежутков. Кабельная бумага является изоляционным материалом медного обмоточного провода и отводов высокого напряжения.

Доля твердой (целлюлозной) изоляции в трансформаторах составляет 8 % от массы всего аппарата [4]. Поверхность соприкосновения целлюлозной изоляции с маслом приблизительно составляет $0,5-1,0^2$ см на 1 г масла для различных типов трансформаторов. Соответственно, при деградации бумажной изоляции достаточно большое количество волокон целлюлозы поступает в объем масла.

Загрязнителями масла являются и конструкционные металлы (медь, сталь), используемые для обмоток, шин, изготовления баков, опорных, крепежных деталей и других узлов трансформатора. Эти металлы образуют осадок и ускоряют окислительные процессы.

Проведены исследования по влиянию механических примесей в целом на пробивное напряжение трансформаторного масла [5], установлена связь размеров частиц механи-

ческих примесей и пробивного напряжения [6]. Однако не изучено влияние отдельных компонентов (природы) механических примесей и их концентрации на электрические показатели. Исследование этого аспекта позволит оптимизировать оборудование очистки трансформаторного масла.

Цель работы – изучение влияния природы и концентрации механических примесей на электрическую прочность трансформаторного масла.

Электрическая прочность равна отношению пробивного напряжения к расстоянию между электродами. Для расчета электрической прочности трансформаторного масла гидрокрекинга (ГК) были произведены замеры пробивного напряжения на высоковольтном приборе АИМ-80 по ГОСТ 6581-75 образцов масла с механическими примесями в различной концентрации. Эксперименты были проведены при температуре 25°C с чистым маслом ГК, на модельных смесях масла ГК с мелкодисперсной сталью, с мелкодисперсной медью, с волокнами целлюлозы и с водой в эмульгированном состоянии. Концентрация механических примесей менялась в интервале 0,006-0,054 г / 100 г масла. Концентрация воды составляла 0-20 г / т масла (0-0,002 г / 100 г масла).

На электрическую прочность диэлектриков, в частности трансформаторного масла, влияет неоднородность поля, химические изменения в диэлектрике и т.д., поэтому пробой может возникать при разном напряжении. Следовательно, пробивное напряжение необходимо определять средним значением. В данной работе среднее значение определялось по результатам шести измерений. С учетом полученных результатов измерений пробивного напряжения и расстояния между электродами 2,5 мм были рассчитаны показатели электрической прочности.

На рис. 1 приведены зависимости электрической прочности от концентрации мелкодисперсной стали и меди, на рис. 2 – от концентрации волокон целлюлозы. На обоих рисунках для сопоставления результатов приведена электрическая прочность чистого масла ГК.

На рис. 3 приведена зависимость электрической прочности трансформаторного масла ГК от количества воды в нем. Кон-

центрация воды в модельной смеси менялась от 0 до 20 г/т.

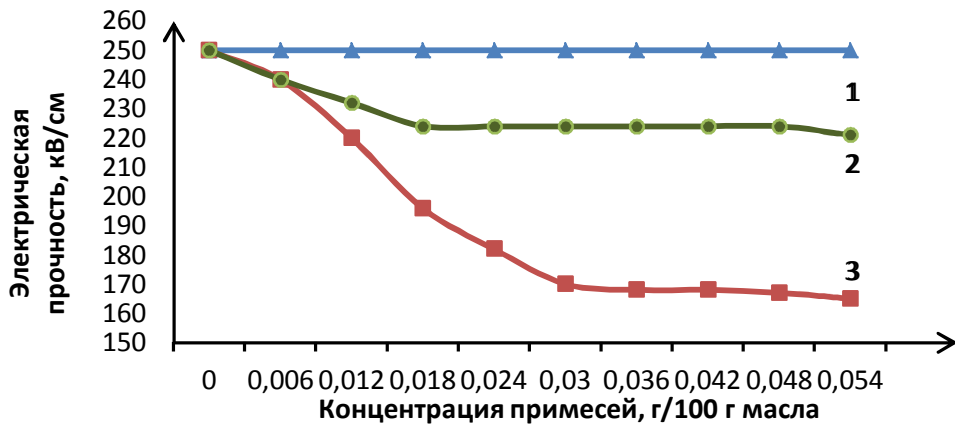


Рис. 1. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от концентрации примесей: 1 – чистое масло ГК; 2 – масло ГК + сталь; 3 – масло ГК + медь

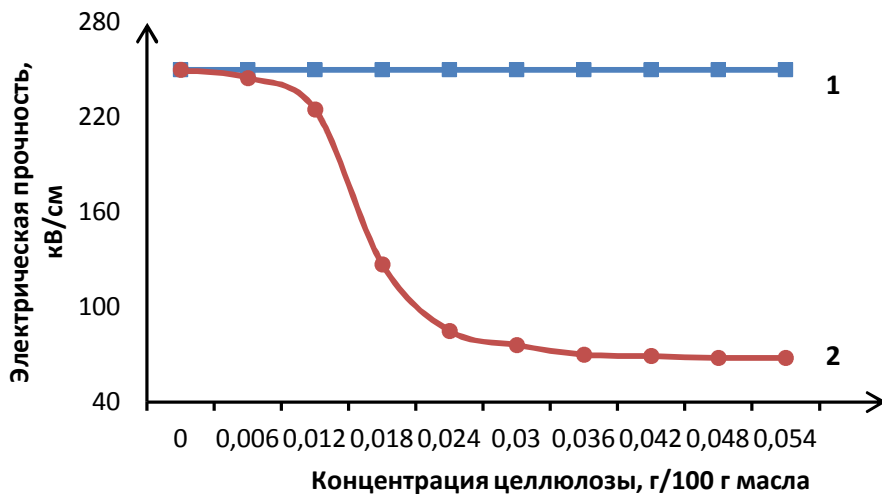


Рис. 2. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от концентрации волокон целлюлозы: 1 – чистое масло ГК; 2 – масло ГК + целлюлоза

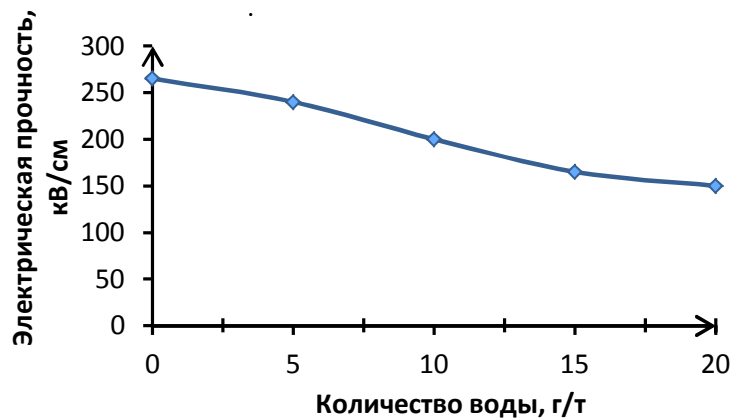


Рис. 3. Зависимость электрической прочности от концентрации воды в масле

Результаты исследования показали, что электрическая прочность трансформаторного масла ГК в присутствии примеси стали снижается незначительно, показатели стабильны, что свидетельствует об отсутствии необходимости очистки масла от частиц стали, тем более, что сталь не оказывает влияния на окисление масла. Присутствие медных частиц помимо ускорения окислительного процесса влияют и на пробивное напряжение, которое меняется в рассматриваемом интервале концентраций в 1,52 раза по сравнению с чистым маслом. При концентрации 0,054 г / 100 г масла его электрическая прочность снижается до 164 кВ/см, что при расстоянии между электродами 2,5 мм соответствует пробивному напряжению 41 кВ. Пробивное напряжение чистого масла составляет не менее 60 кВ.

Значительное снижение электрической прочности трансформаторного масла ГК происходит в присутствии волокон целлюлозы. При концентрации от 0,012 г / 100 г масла происходит резкое снижение показателя до 68 кВ/см (при 0,054 г / 100 г масла). По сравнению с чистым маслом значение электрической прочности масла снижается в 3,7 раза. Пробивное напряжение при концентрации 0,054 г / 100 г масла составляет 17 кВ.

Также была проведена серия измерений пробивного напряжения смеси, состоящей из трансформаторного масла, мелкодисперсной стали и меди, и целлюлозы для исследования их одновременного воздействия на электрическую прочность масла. Повышение концентрации металлов во взвешенном состоянии оказывает незначительное влияние на электрическую прочность масла по сравнению с целлюлозой. Увеличение количества целлюлозных волокон в объеме масла в присутствии взвеси мелкодисперсных металлов снижает электрическую прочность трансформаторного масла до 68 кВ/см.

Присутствие эмульгированной воды в трансформаторном масле в концентрации 0-0,002 г / 100 г масла уменьшает его электрическую прочность в 1,77 раза (рис. 3).

Таким образом, помимо осушки трансформаторного масла следует обратить особое внимание на целлюлозные примеси. Задачу усложняет факт присутствия целлюлозных волокон и на стадии заливки свежего масла в маслonaполненное электрооборудование, и в процессе его эксплуатации в результате деградации твердой бумажной изоляции.

Выводы:

1. Изучено влияние механических примесей (их природы и концентрации) на электрическую прочность трансформаторного масла ГК.

2. Для модельных смесей с мелкодисперсной сталью, медью и волокнами целлюлозы в концентрации 0,006-0,054 г / 100 г масла были замерены показатели пробивного напряжения и рассчитана электрическая прочность масла.

3. Проведены измерения пробивного напряжения и рассчитаны электрическая прочность трансформаторного масла ГК в зависимости от количество воды в нем.

4. Установлено, что модельные смеси, содержащие волокна целлюлозы, показали наихудшие значения пробивного напряжения, а соответственно электрической прочности. Электрическая прочность снизилась в 3,7 раза, в то время как в присутствии воды электрическая прочность снизилась в 1,77 раза.

5. Модельные смеси, содержащие одновременно мелкодисперсную сталь и медь, а также целлюлозу показали преобладающее влияние целлюлозы и снижение электрической прочности трансформаторного масла до 68 кВ/см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митькин Ю.А. Диагностические статистические характеристики напряжений масла действующих силовых транс-

форматоров 110 кВ / Ю.А. Митькин, О.С. Мельникова // Вестник ИГЭУ. 2016. Вып. 3. С. 40-46.

2. **Пуликов П.Г.** Разработка и исследование датчика механических примесей в трансформаторном масле / П.Г. Пуликов // Диагностика и надежность энергооборудования. 2012. № 1 (43). С. 31-35.

3. **Фасыхов А.Р.** Характеристики механических примесей трансформаторных масел / А.Р. Фасыхов, Л.Р. Гайнуллина // Электронный сборник статей по материалам LXXXIV студенческой международной научно-практической конференции. Новосибирск: СибАК, 2019. № 12 (83). С. 174-177 [Электронный ресурс]. URL: [https://sibac.info/archive/technic/12 % 2883 %29.pdf](https://sibac.info/archive/technic/12%202883%2029.pdf)

4. **Гарифуллин М.Ш.** Диагностика состояния бумажной изоляции по ИК-

спектрам отражения и спектрам люминесценции / М.Ш. Гарифуллин // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С. 57-65.

5. **Yusupov D.T.** Influence of various impurities on electric strength of transformer oil and method of removal / D.T. Yusupov // Power engineering: economics, technique, ecology. 2018. № 2. P. 58-63.

6. **Мельникова О.С.** Влияние распределения частиц примесей на электрическую прочность трансформаторного масла / О.С. Мельникова // Вестник ИГЭУ. 2019. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-chastits-primesey-na-elektricheskuyu-prochnost-transformatornogo-masla> (дата обращения: 24.07.2021).

Гайнуллина Лейсан Раисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» Казанского государственного энергетического университета

Фасыхов Айдар Равилевич – магистрант кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» Казанского государственного энергетического университета

Leysan R. Gainullina – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Energy Supply of Enterprises and Energy-Saving Technologies, Kazan State Power Engineering University

Aydar R. Fasykhov – Master Student, Department of Power Supply of Enterprises and Energy-Saving Technologies, Kazan State Power Engineering University

Статья поступила в редакцию 29.07.21, принята к опубликованию 26.08.21