

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.315.5

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-60-70>

Исследование зависимости электрического сопротивления железного порошка от усилия сжатия

М.С. Разумов^{1✉}, Р.Е. Чаплыгин¹, П.В. Глазков¹, О.Н. Мальцев¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: mika_1984_@mail.ru

Резюме

Цель исследования – установление зависимости электрического сопротивления железного порошка от усилия сжатия.

Методы. Порошок электротехнического железа был помещён во втулку. Втулка с двух сторон плотно закрыта металлическими поршнями, защищёнными от внешних источников электрического сопротивления диэлектрическими проставками. К одной из проставок приложена сила $\bar{F}$. Тензодатчик измеряет количество приложенной силы, а омметр регистрирует наличие электрического сопротивления и его количество на участке цепи. С помощью данной установки, был поставлен полный факторный эксперимент, в процессе которого изменялись навески порошка, брались навеска по 7 г, а также по 14 г и отслеживались вышеуказанные параметры, изменение электрического сопротивления в данном случае выбрано как критерий оптимизации при оценке электропроводности на участке цепи.

Результаты исследования показали эмпирическую зависимость сопротивления электротехнического железного порошка относительно изменения давления на него путём проведения полного факторного эксперимента. Таким образом, впервые получены новые зависимости электрического сопротивления железного порошка от усилия сжатия. Данная зависимость показывает, что из трех исследуемых факторов наибольшее влияние оказывает сила сжатия, при увеличении сопротивление падает, также прослеживается падение сопротивления при увеличении диаметра втулки, что моделирует диаметр сечения проводника. При увеличении массы порошка сопротивление возрастает, из чего можно сделать вывод о том, что с увеличением длины проводника электропроводность снижается.

Заключение. В результате проведения опытов установлено, что электротехнический порошок железа изменяет своё электрическое сопротивление в зависимости от приложенной к нему силы, диаметра проводника и массы сжимаемого порошка. По результатам эксперимента составлена эмпирическая зависимость между этими факторами.

Ключевые слова: порошок; давление; сопротивление; эксперимент.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Исследование зависимости электрического сопротивления железного порошка от усилия сжатия / М.С. Разумов, Р.Е. Чаплыгин, П.В. Глазков, О.Н. Мальцев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 60–70. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-60-70>

Поступила в редакцию 25.09.2024

Подписана в печать 12.11.2024

Опубликована 13.12.2024

© Разумов М.С., Чаплыгин Р.Е., Глазков П.А., Мальцев О.Н., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии /
Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2024;14(4):60–70

Investigation of the dependence of the electrical resistance of Iron powder on the compressive force

Mikhail S. Razumov¹✉, Roman E. Chaplygin¹, Pavel V. Glazkov¹, Oleg N. Maltsev¹

¹ Southwest State University
50 let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: mika_1984_@mail.ru

Abstract

The purpose of the study is to establish the dependence of the electrical resistance of iron powder on the compression force.

Methods. The electrical iron powder was placed in a sleeve. The sleeve is tightly closed on both sides by metal pistons protected from external sources of electrical resistance by dielectric spacers. A force F is applied to one of the spacers. The strain gauge measures the amount of applied force, and the ohmmeter records the presence of electrical resistance and its amount in the circuit section. Using this setup, a full factorial experiment was conducted, during which the powder samples were changed, a 7-gram sample was taken, as well as a 14-gram sample, and the above parameters were monitored. In this case, the change in electrical resistance was chosen as an optimization criterion when assessing electrical conductivity in a circuit section.

The results of the study showed an empirical dependence of the resistance of electrical iron powder on the change in pressure on it, by conducting a full factorial experiment. Thus, for the first time, new dependencies of the electrical resistance of iron powder on the compression force were obtained. This dependence shows that of the three factors under study, the greatest influence is exerted by the compression force, with an increase, the resistance decreases, a decrease in resistance is also observed with an increase in the bushing diameter, which models the diameter of the conductor cross-section. With this increase in the mass of the powder, the resistance increases, from which it can be concluded that with an increase in the length of the conductor, the electrical conductivity decreases.

Conclusion. As a result of the experiments, it was found that the electrical iron powder changes its electrical resistance depending on the force applied to it, the diameter of the conductor and the mass of the compressed powder. Based on the results of the experiment, an empirical relationship was compiled between these factors.

Keywords: powder; pressure; resistance; experiment.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Razumov M.S., Chaplygin R.E., Glazkov P.V., Maltsev O.N. Investigation of the dependence of the electrical resistance of Iron powder on the compressive force. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):60–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-60-70>

Received 25.09.2024

Accepted 12.11.2024

Published 13.12.2024

Введение

По данным Grand View Research, рынок токопроводящих чернил оценивался в 2,34 млрд долл. США в 2020 г. и прогнозируется, что он достигнет 4,11 млрд долл. США к 2028 г. со среднегодовым темпом роста (CAGR) около 7,3%. Рост рынка обусловлен увеличением спроса на гибкие и печатные электронные устройства, которые требуют использования эффективных

и экономически выгодных токопроводящих материалов [1].

В последнее время всё сильнее развиваются технологии 3D-печати [2]. Совсем недавно 3D-печать применялась только для макетирования, а сейчас научились печатать даже полноценные изделия, не только из пластика, но и из металла. 3D-печать металлом – очень молодое и перспективное направление. С его помощью можно создавать детали и даже узлы ма-

шин и механизмов, очень сложных в геометрическом плане, настолько, что изготовление таких деталей литьём, ковкой, штамповкой, резанием или электроэрозией либо невыгодно, либо очень сложно и дорого, а иногда просто невозможно. Для примера можно привести изготовление патрубков сложной конструкции, когда для обеспечения отверстия сложной формы просто не существует инструмента и приходится изготавливать деталь, опираясь на технологические возможности. Применение аддитивных технологий в отечественной промышленности позволит не только обеспечить снижение затрат на материалы, но и вывести качество продукции на новый уровень. Но если необходимые прочностные характеристики достижимы при использовании пластика, то нет нужды тратить время и ресурсы на изготовление металлических деталей, поскольку как 3D-печать не отнимает много времени, не ресурсозатратна и не даёт отходов производства. Однако если деталь должна проводить электрический ток, то печать её с помощью обычных филаментов, увы, невозможна. В обычном виде пластик, как известно, ток проводить не способен. Поэтому одно из перспективных направлений в создании филамента – разработка токопроводящего прутка, пригодного для производства изделий, способных обеспечивать передачу электрического тока. Примером таких изделий могут служить дорожки на электрических платах, изготовленные при помощи специальных станков, основанных на технологии FDM. Также в перспективе существует возможность изготовления с применением подобной технологии простейших радиокомпонентов и электрод-инструментов для электрохимической обработки [3].

Для создания пластика, обладающего электропроводностью, можно пойти путём наименьшего сопротивления: соеди-

нить металл и пластик. Такого рода композитный материал будет проводить электрический ток, при этом сохраняя свою низкую температуру плавления, необходимую для использования его в FDM принтерах [4]. Можно в определённой пропорции смешать пластик и металлический порошок таким образом, чтобы такой материал можно было использовать в печати, а сила усадки сблизит частицы порошка так, что он будет проводить ток.

Известно, что металлический порошок, не проводящий электрический ток в нормальных условиях, в сжатом состоянии будет проводить ток [5]. При этом чем больше будет сила [6], тем лучше он будет проводить ток [7]. Тот же результат наблюдается и при нагреве во время сжатия [8]. Данный факт вызван плохим взаимодействием между частичками порошка [9] и процессом окисления [10]. Имеются исследования по электропроводности спеченных порошков [11], например: микроструктурные изменения в конструкционных сталях во время спекания и влияние на электропроводность [12], также алюминиевых [13] и никелевых сплавах [14]. Таким образом, изучение зависимости электрического сопротивления железного порошка от усилия сжатия, является актуальной задачей [15]. Данную задачу ставят перед собой не только ученые из России, но и зарубежные исследователи считают данную тематику актуальной [16]. Стоит отметить труды, посвященные неоднородности удельного электрического сопротивления железа вдоль кривой плавления [17]. Развитием данной темы является модель для характеристики удельного электрического сопротивления сверхпроводников [18], а также термодинамические свойства и фазовые равновесия в системе [19]. Интерес зарубежных ученых к данной тематике еще раз доказывает актуальность этого направления.

Цель исследования – экспериментальным путём установить взаимосвязь между

электропроводностью, сдвливающей силой, массой порошка и диаметром проводника, чтобы вывести закон их изменения относительно друг друга [20].

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) разработать экспериментальную установку;
- 2) собрать экспериментальную установку;
- 3) провести необходимые эксперименты;
- 4) проанализировать полученные результаты;
- 5) получить эмпирическую зависимость сопротивления от массы порошка, диаметра проводника и сжимающей силы.

Материалы и методы

Для проведения эксперимента была собрана установка (рис. 1): порошок электротехнического железа 1 помещён во втулку 2. Втулка с двух сторон плотно за-

крыта металлическими поршнями 3, защищёнными от внешних источников электрического сопротивления диэлектрическими проставками 4. К одной из проставок приложена сила $\vec{F}$. Тензодатчик S-образный К-Р-16А 5 измеряет количество приложенной силы, а мультиметр цифровой MASTER MAS838L 6 регистрирует наличие электрического сопротивления и его количество на участке цепи. Втулка была выполнена из высокомолекулярного полиэтилена. Теоретически, это мог быть любой другой материал, не проводящий электрический ток, например, керамика или фторопласт. Однако керамика – хрупкий материал и при сжатии возможно произойдет разрушение. Фторопласт – очень пластичный, что, в свою очередь, может привести к изменению объема испытуемой втулки и негативно повлиять на качество эксперимента. Высокомолекулярный полиэтилен – очень плотный, приятный в обработке, прочный и жёсткий, поэтому идеально подошёл.

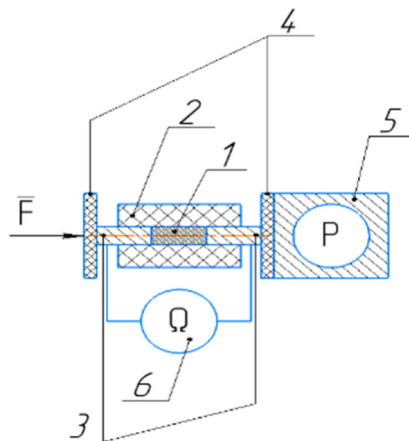


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. The scheme of the experimental installation

С помощью данной установки, был поставлен полный факторный эксперимент (рис. 2), в процессе которого изменялись навески порошка, брались навеска по 7 г и 14 г и отслеживались вышеуказанные параметры, изменение электрического сопротивления в данном случае выбрано как критерий оптимизации при оценке

электропроводности на участке цепи. Для приложения усилия использовались стачные тиски, усилие регистрировалось S-образным датчиком. Эксперимент повторяли три раза, после чего получили среднее значение исследуемых параметров.

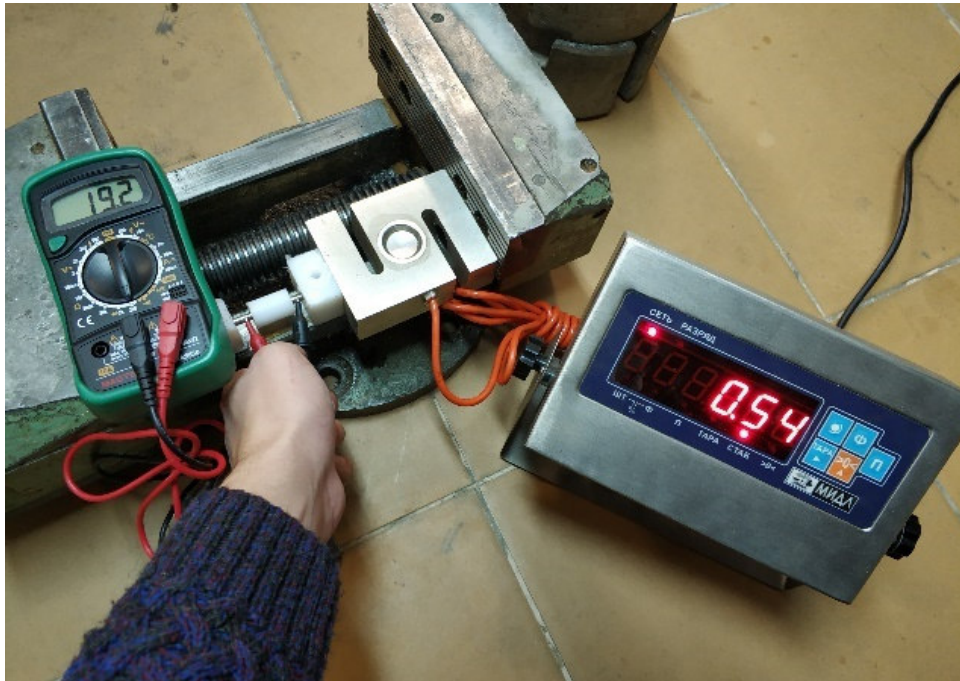


Рис. 2. Проведение полного факторного эксперимента

Fig. 2. Conducting a complete factorial experiment

Результаты и их обсуждение

Данные, полученные в ходе экспериментов, внесены в таблицу 1. Была определена погрешность и установлен доверительный интервал, опыты повторялись

три раза, затем было посчитано среднее значение.

Диметр втулки был выбран 2 мм и 5 мм. Данные опыты показали, что с увеличением диаметра сопротивление уменьшается, причем это значительно проявляется с увеличением массы порошка.

Табл. 1. Результаты опытов

Table 1. The results of the experiments

Масса порошка 7 г		Масса порошка 14 г	
F, кгс	Ω , Ом	F, кгс	Ω , Ом
D = 2 мм			
14,3	986,3	14,3	5446,7
19,0	514,7	19	2716,7
23,8	398,3	23,8	1556,3
28,6	282,7	28,6	969,3
33,3	215,7	33,3	683,0
38,1	173,7	38,1	470,0
42,9	85,7	42,9	223,3
47,6	714,3	47,6	170,0
52,4	59,0	52,4	140,0
57,1	53,3	57,1	106,7
61,9	39,7	61,9	86,7
66,7	33,3	66,7	78,3

Окончание табл. 1. Результаты опытов**Ending table 1.** The results

Масса порошка 7 г		Масса порошка 14 г	
F, кгс	Ω , Ом	F, кгс	Ω , Ом
D = 5 мм			
19	430,7	19	1499,7
23,8	299,0	23,8	966,7
28,6	155,3	28,6	522,7
33,3	103,3	33,3	325,7
38,1	75,3	38,1	236,0
42,9	67,0	42,9	197
47,6	57,7	47,6	120
52,4	52,3	52,4	93
57,1	42,0	57,1	67
61,9	35,3	61,9	60
66,7	31,3	66,7	46

По данным таблицы 1 построены графики зависимостей сопротивления от приложенной силы (рис. 3).

На графиках наглядно видно падение сопротивления от усилия сжатия, что, соответственно, обеспечивает влияние на электропроводность. В данном случае

критерием оптимизации электропроводности был выбран параметр электрического сопротивления и его количество на участке цепи, поскольку чем ниже сопротивление, тем выше электропроводность.

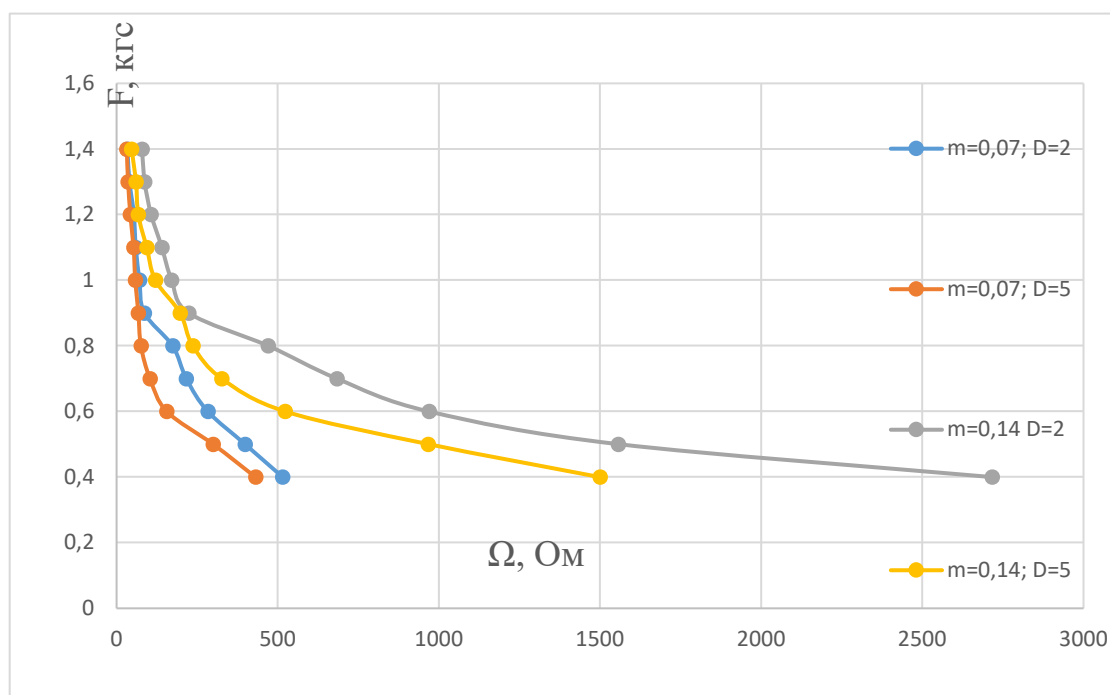


Рис. 3. Графики зависимостей сопротивления от усилия сжатия

Fig. 3. Graphs of the dependence of resistance on the compression force

На основании данных графиков были выбраны параметры силы сжатия в пределах от 19 до 66,7 кгс, диаметр проводника был выбран с учетом наиболее применяемых на практике, масса порошка выбрана с учетом характеристик испытательного стенда.

Для оценки влияния параметров зависимости электрического сопротивления железного порошка от усилия сжатия составили матрицу планирования полного факторного эксперимента типа 2^3 (табл. 2).

Таблица 2. Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^3

Table 2. Planning matrix for a complete factor experiment of type 2^3

Номер опыта	X ₁		X ₂		X ₃		Ω ₁	Ω ₂	Ω ₃	ΔΩ	lnΔΩ
	код	F, кгс	код	D, мм	код	m, г					
1	–	19	–	2	–	7	1469	658	832	986,3	6,89
2	+	66,7	–	2	–	7	30	35	35	33,3	3,51
3	–	19	+	5	–	7	411	441	440	430,7	6,07
4	+	66,7	+	5	–	7	28	33	33	31,3	3,44
5	–	19	–	2	+	14	9030	4060	3250	5446,7	8,60
6	+	66,7	–	2	+	14	80	70	85	78,3	4,36
7	–	19	+	5	+	14	1323	1599	1527	1483	7,30
8	+	66,7	+	5	+	14	30	40	48	39,3	3,67

Таким образом, впервые получены новые зависимости электрического сопротивления железного порошка от усилия сжатия.

После потенцирования получили следующую эмпирическую зависимость:

$$R = e^{19,54} \cdot F^{-2,77} \cdot D^{-0,77} \cdot m^{1,45}.$$

Данная зависимость показывает, что из трех исследуемых факторов наибольшее влияние оказывает сила сжатия, при увеличении которой сопротивление падает, также прослеживается падение сопротивления при увеличении диаметра втулки, что моделирует диаметр сечения проводника. При увеличении массы порошка сопротивление возрастает, из чего можно сделать вывод о том, что с увеличением длины проводника электропроводность снижается.

Вывод

В результате проведения опытов установлено, что электротехнический по-

рошок железа изменяет своё электрическое сопротивление в зависимости от приложенной к нему силы, диаметра проводника и массы сжимаемого порошка. По результатам эксперимента составлена эмпирическая зависимость между этими факторами. Полученная модель показывает, что сжимающее усилие в значительной мере влияет на токопроводимость железного порошка, т. к. на порядок снижается сопротивление данного порошка, диаметр сечения также снижает сопротивление порошка. При этом количество порошка с учетом того, что он был заключен во втулку, с увеличением приводит к возрастанию сопротивления и негативно влияет на электропроводность.

Таким образом, получена эмпирическая модель зависимости электрического сопротивления железного порошка от усилия сжатия, которая в дальнейшем позволит создать токопроводящий полимер для 3D-печати. Данный полимер будет прямым конкурентом токопроводящих

чернил с AgNPs, который используется для создания гибких печатных плат (FPC), сенсоров, RFID-меток и OLED-дисплеев [20].

Список литературы

1. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors / S.Y. Wu, C. Yang, W. Hsu, L. Lin // *J. Microsystems & Nanoengineering*. 2015. Vol. 1, no. 1. P. 1–9.
2. Перспективы применения и развития токопроводящего филамента / В.В. Куц, М.С. Разумов, А.К. Досумов, Д.Е. Крохин // *Техника и технологии: пути инновационного развития: сборник научных трудов 9-й Международной научно-практической конференции: в 2-х т. Т. 1*. Курск: Университетская книга, 2020. С. 249–252.
3. Разработка токопроводящего филамента для 3D-печати / В.В. Куц, М.С. Разумов, А.К. Досумов, С.А. Чевычелов // *СТИН*. 2021. № 7. С. 37–39.
4. Исследование материала бронзовой втулки, полученной методом 3D-печати из металлополимерной проволоки / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, В.А. Стрижеус, К. Бугеррума // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 3. С. 8–20. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-8-20>
5. Экспериментальные исследования электропроводности железного порошка / М.С. Разумов, Р.Е. Чаплыгин, О.Н. Мальцев, И.А. Дрынова // *Проблемы развития современного общества: сборник научных статей 9-й Всероссийской национальной научно-практической конференции: в 3-х т. Т. 3*. Курск: Университетская книга, 2024. С. 442–446.
6. Method to determine the electrical resistance of a metallic powder mass under compression / J.M. Montes, F.G. Cuevas, F. Ternero, R. Astacio, E.S. Caballero, J. A. Cintas // *Metals*. 2017. Vol. 7, no. 11. P. 479. <https://doi.org/10.3390/met7110479>
7. Токопроводящие полимерные композиции для 3D-печати / М.И. Абдуллин, А.А. Басыров, Н.В. Колтаев, Р.Р. Нагаев, Ю.А. Кокшарова // *Бюллетень науки и практики*. 2016. № 4 (5). С. 44–50.
8. Электропроводность компактированных нанодисперсных графитовых материалов / И.М. Голев, В.Н. Санин, Е.А. Русских, Д.В. Русских // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2015. № 1 (14). С. 66–73.
9. Пожидаева С.Д., Иванов А.М. Поверхностные отложения продуктов и макрокинетические характеристики взаимодействия меди с оксидом меди (II) в водных растворах солей и кислот // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2015. № 4 (17). С. 61–70.
10. Осинкин Д.А., Журавлев В.Д. Никель-керамические электроды с повышенным содержанием никеля для электрохимических устройств на твердых электролитах // *Журнал прикладной химии*. 2020. Т. 93, № 2. С. 298–304.
11. Трехмерные прототипы на основе угленаполненных электропроводящих композиций / М.И. Абдуллин, А.А. Басыров, Н.В. Колтаев, Ю.А. Кокшарова // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2015. № 11(82), ч. 2. С. 8–13.
12. Бродова И.Г., Зельдович В.И., Хомская И.В. Фазово-структурные превращения и свойства цветных металлов и сплавов при экстремальных воздействиях // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121, № 7. С. 696–730.
13. Поверхностное микроструктурирование горячекатаных углеродистых конструкционных сталей при комплексном воздействии лазерным излучением / И.В. Минаев, С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, Д.В. Журба, И.В. Голышев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2024. Т. 14, № 2. С. 8–21. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-8-21>

14. Структура и свойства алюмоматричных композиционных материалов, полученных в нестационарном силовом поле и упрочненных наноразмерными добавками / В.И. Костиков, В.Ю. Лопатин, Ж.В. Еремеева, Е.В. Симонова, Ю.Ю. Капланский, Г.Х. Шарипзянова [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2014. № 1. С. 52–60.
15. Дьячкова Л.Н. Структура и свойства композиционных медно-графитовых материалов // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2020. Т. 64, № 4. С. 488–494.
16. Electrical resistivity of iron phosphides at high-pressure and high-temperature conditions with implications for lunar core's thermal conductivity / Y. Yin, K. Zhai, B. Zhang, S. Zhai // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2019. Vol. 124, no. 6. P. 5544–5556. <https://doi.org/10.1029/2018jb017157>
17. Electrical resistivity of Fe-C alloy at high pressure: effects of carbon as a light element on the thermal conductivity of the earth's core / C. Zhang, J. F. Lin, Y. Liu, S. Feng, C. Jin, M. Hou [et al.] // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2018. Vol. 123, no. 5. P. 3564–3577. <https://doi.org/10.1029/2017jb015260>
18. Wagle F., Steinle-Neumann G. Electrical resistivity discontinuity of Iron along the melting curve // Geophys. J. Int. 2018. Vol. 213, no. 1. P. 237–243. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx526>
19. Влияние механического активирования на тепло- и электропроводность спеченных порошков CU, CR и композита CU/CR / А.С. Рогачев, К.В. Кусков, Д.О. Московских, А.А. Усенко, А.О. Орлов, Н.Ф. Шкодич [и др.] // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468, № 5. С. 508.
20. Сравнение электропроводности токопроводящих полимерных композиций, наполненных техническим углеродом и углеродными волокнами / М.И. Абдуллин, А.А. Басыров, А.С. Гадеев, Н.В. Колтаев, С.Н. Николаев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2014. № 11. С. 16–21.

Reference

1. Wu S.Y., Yang C., Hsu W., Lin L. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors. *J. Microsystems & Nanoengineering*. 2015;1(1):1-9.
2. Kuts V.V., Razumov M.S., Dosumov A.K., Krohin D.E. Prospects for the application and development of conductive filament. In: *Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya: sbornik nauchnykh trudov 9-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Engineering and technology: ways of innovative development: collection of scientific papers of the 9th International scientific and practical conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2020. P. 249–252. (In Russ.)
3. Kuts V.V., Razumov M.S., Dosumov A.K., Chevychelov S.A. Development of conductive filament for 3D printing. *STIN*. 2021;(7):37-39. (In Russ.)
4. Latypov R.A., Ageev E.V., Strizheus V.A., Bugerruma K. Study of the material of the bronze bushing obtained by 3D printing from metal-polymer wire. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(3):8-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-8-20>
5. Razumov M.S., Chaplygin R.E., Maltsev O.N., Drynova I.A. Experimental studies of the electrical conductivity of Iron powder. In: *Problemy razvitiya sovremennogo obshchestva: sbornik nauchnykh statei 9-i Vserossiiskoi natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Problems of development of modern society: collection of scientific articles of the 9th All-Russian national scientific and practical conference*. Vol. 3. Kursk: Universitetskaya kniga; 2024. P. 442–446. (In Russ.)
6. Montes J.M., Cuevas F.G., Ternero F., Astacio R., Caballero E.S., Cintas J.A. Method to determine the electrical resistance of a metallic powder mass under compression. *Metals*. 2017;7(11):479. <https://doi.org/10.3390/met7110479>

7. Abdullin M.I., Basyrov A.A., Koltaev N.V., Nagaev R.R., Koksharova Yu.A. Conductive polymer composites for 3D printing. *Byulleten' nauki i praktiki = Bulletin of Science and Practice*. 2016;(4):44-50. (In Russ.)
8. Golev I.M., Sanin V.N., Russkikh E.A., Russkikh D.V. Electrical conductivity of compacted nanodispersed graphite materials. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2015;(1):66-73. (In Russ.)
9. Pozhidaeva S.D., Ivanov A.M. Surface deposits of products and macrokinetic characteristics of the interaction of copper with Copper (II) oxide in aqueous solutions of salts and acids. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2015;(4):61-70. (In Russ.)
10. Osinkin D.A., Zhuravlev V.D. Nickel-ceramic electrodes with increased Nickel content for electrochemical devices on solid electrolytes. *Zhurnal prikladnoi khimii = Journal of Applied Chemistry*. 2020;93(2):298-304. (In Russ.)
11. Abdullin M.I., Basyrov A.A., Koltaev N.V., Koksharova Yu.A. Three-dimensional prototypes based on carbon-filled conductive compositions. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk = Actual problems of humanitarian and natural sciences*. 2015;(11-2):8-13. (In Russ.)
12. Brodova I.G., Zeldovich V.I., Khomskaya I.V. Phase-structural transformations and properties of non-ferrous metals and alloys under extreme influences. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metal science*. 2020;121(7):696-730. (In Russ.)
13. Minaev I.V., Kutepov S.N., Klementyev D.S., Zhurba D.V., Golyshev I.V. Surface microstructuring of hot-rolled Carbon structural steels under complex action of laser radiation *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2024;4(2):8-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-8-21>
14. Kostikov V.I., Lopatin V.Yu., Ereemeeva Zh.V., Simonova E.V., Kaplansky Yu.Yu., Sharipzhanova G.Kh, et al. Structure and properties of aluminum matrix composite materials obtained in a non-stationary force field and strengthened with nanosized additives. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2014;(1):52-60. (In Russ.)
15. Dyachkova L.N. Structure and properties of copper-graphite composite materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2020;64(4):488-494. (In Russ.)
16. Yin Y., Zhai K., Zhang B., Zhai S. Electrical resistivity of iron phosphides at high-pressure and high-temperature conditions with implications for lunar core's thermal conductivity. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2019;124(6):5544–5556. <https://doi.org/10.1029/2018jb017157>
17. Zhang C., Lin J. F., Liu Y., Feng S., Jin C., Hou, M., et al. Electrical resistivity of Fe-C alloy at high pressure: effects of carbon as a light element on the thermal conductivity of the earth's core. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2018;123(5):3564–3577. <https://doi.org/10.1029/2017jb015260>
18. Wagle F., Steinle-Neumann G. Electrical resistivity discontinuity of iron along the melting curve. *Geophys. J. Int.* 2018;213(1):237–243. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx526>
19. Rogachev A.S., Kuskov K.V., Moskovskikh D.O., Usenko A.A., Orlov A.O., Shkodich N.F., et al. Effect of mechanical activation on thermal and electrical conductivity of sintered CU, CR powders and CU/CR composite. *Reports of the Academy of Sciences*. 2016;468(5):508. (In Russ.)
20. Abdullin M.I., Basyrov A.A., Gadeev A.S., Koltaev N.V., Nikolaev S.N. Comparison of electrical conductivity of conductive polymer composites filled with carbon black and carbon fibers. *Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov = Journal of scientific publications of postgraduate and doctoral students*. 2014;(11):16–21. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Разумов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mika_1984_@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2015-3322, Researcher ID: N-3272-2016, Scopus ID: 54879716500, Author ID: 659383, SPIN-код: 4551-8476

Чаплыгин Роман Евгеньевич, студент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: romusia72@mail.ru, ORCID: 0009-0003-7633-9852

Глазков Павел Витальевич, студент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pavel.glazkovv@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-2860-0702

Мальцев Олег Николаевич, студент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oleglaguxa@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1337-7145

Mikhail S. Razumov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mika_1984_@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2015-3322, Researcher ID: N-3272-2016, Scopus ID: 54879716500, Author ID: 659383, SPIN-код: 4551-8476

Roman E. Chaplygin, Student of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: romusia72@mail.ru, ORCID: 0009-0003-7633-9852

Pavel V. Glazkov, Student of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwestern State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pavel.glazkovv@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-2860-0702

Oleg N. Maltsev, Student of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: oleglaguxa@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1337-7145