

УДК 539.531

***ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ  
ПСЕВДОСПЛАВА ЖЕЛЕЗО-МЕДЬ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ  
ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ  
МЕДИ***

***Протопопова Ю. Д.***

*Студент 4 курса, Аэрокосмического факультета,  
Кафедра “Механика композиционных материалов и конструкций”,  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

***Кареба П. Н.***

*Студент 4 курса, Аэрокосмического факультета,  
Кафедра “Механика композиционных материалов и конструкций”,  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

***Зобнина А. А.***

*Студент 4 курса, Аэрокосмического факультета,  
Кафедра “Механика композиционных материалов и конструкций”,  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

***Выймова С. Д.***

*Студент 4 курса, Аэрокосмического факультета,  
Кафедра “Механика композиционных материалов и конструкций”,  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Науч.рук. профессор, доктор физ.-мат. наук А.А.Чекалкин

**Аннотация**

Изготовлены образцы псевдосплава Fe-Cu различной геометрии: цилиндрической формы и формы прямоугольных брусков. Проведены эксперименты в целях исследования влияния меди на такие свойства композита, как твердость и электропроводность. Полученные данные использованы для построения зависимостей рассмотренных свойств от процентного содержания меди.

**Ключевые слова:** твердость, композиционный материал, псевдосплав, порошковая металлургия, электропроводность

***RESEARCH OF THE HARDNESS AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY  
OF AN FE-CU PSEUDO-ALLOY OBTAINED BY POWDER METALLURGY,  
DEPENDING ON THE COPPER CONTENT***

***Protopopova Y. D.***

*4th year student, Aerospace Faculty,*

*Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures”,*

*Perm National Research Polytechnic University,*

*Perm, Russia*

***Kareba P. N.***

*4th year student, Aerospace Faculty,*

*Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures”,*

*Perm National Research Polytechnic University,*

*Perm, Russia*

***Zobnina A. A.***

*4th year student, Aerospace Faculty,*

*Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures”,*

*Perm National Research Polytechnic University,*

*Perm, Russia*

***Vyimova S. D.***

*4th year student, Aerospace Faculty,*

*Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures”,*

*Perm National Research Polytechnic University,*

*Perm, Russia*

### **Abstract**

Samples of Fe-Cu pseudo-alloy of various geometries were made: cylindrical and rectangular bars. Experiments were carried out to research the influence of copper on such properties of the composite as hardness and electrical conductivity. The data obtained were used to plot the dependences of the considered properties on the percentage of copper.

**Keywords:** hardness, composite material, pseudo-alloy, powder metallurgy, electrical conductivity

### **Введение**

Метод порошковой металлургии основательно продвинулся в сферах современных технологий. Используя данный метод, производят детали машин и механизмов, элементы электротехнического оборудования и оснащения атомных реакторов, подшипники и прочие части узлов трения, металлорежущий и породоразрушающий инструмент, охладители испарительного типа, и другие продукты промышленного назначения [4].

Материалы, в которых в процессе их создания добавляют дисперсные упрочняющие частицы, называют дисперсно-упрочненными сплавами или композиционными материалами. Такой тип КМ получают методами порошковой металлургии. Продукты из дисперсно укрепленных сплавов обладают исключительными свойствами и особенностями, такими как

способность к самосмазыванию в процессе трения, демпфирующая способность, износостойкость, устойчивость к высоким температурам и другими [3].

Процесс изготовления псевдосплавов включает применение исходного сырья в виде порошка, который подвергается прессованию и формированию в изделия нужных размеров. Затем изделие проходит термическую обработку при температуре ниже точки плавления основного элемента.

Существует несколько методов: жидкофазное, твердофазное спекание, а также пропитка (инфильтрация). Метод пропитки является самым распространённым в настоящее время.

Для создания крупных элементов машин, подвергающихся ударным нагрузкам, часто используются псевдосплавы Fe-Cu с содержанием меди 15-25%. Они также используются в качестве конструктивных материалов для создания компрессорных лопастей, элементов буровых устройств, резцов и корпусных частей фрез. Псевдосплавы Fe-Cu, содержащие 30% меди, используются для создания электрических контактов, которые отличаются высокой пластичностью и термической устойчивостью.

Подробно рассмотрим компоненты псевдосплавов Fe-Cu. Медь в чистом виде обладает высоким уровнем электропроводности и теплопроводности, устойчива к коррозии как в морской так и в пресной воде и в ряде других химических сред, пластична в сравнении с другими металлами. Но не применяется как конструкционный материал из-за высокой стоимости и низких значений предела текучести. Чистое железо, в свою очередь, обладает хорошими электромагнитными свойствами, на его основе создается множество сплавов, применяемых почти во всех сферах производства. При этом к минусам этого компонента можно отнести низкий показатель коррозионной стойкости и весовые параметры.

В условиях комнатной температуры взаимодействие между компонентами минимально, из-за чего медь и железо вступают в реакцию, но не растворяются один в другом полностью. Наибольшая растворимость меди в

твердом железе наблюдается при температуре 1373 °К и равняется 8-8,5% по массе, тогда как растворимость железа в меди составляет 4%.

В процессе пропитки железа чистой медью происходит активное взаимное проникновение их частиц, что приводит к разрушению железной основы. Таким образом рассматриваемый “гибрид” железа и меди (сплав Fe-Cu) создается методом пропитки спрессованных или спеченных железных заготовок медью или ее сплавами и последующего нагревания. Из-за взаимной смешиваемости составляющих возникает явление диффузионной пористости. Чтобы устранить эти негативные эффекты, можно использовать пористый каркас и пропитывающий материал из насыщенных сплавов при 1373-1473 °К. При этом колебания в композициях из чистых компонентов с напряжениями 100-200 МПа затухают на 1-2% при комнатной температуре [1]. Эффект демпфирования псевдосплава становится больше с увеличением температуры.

### Основная часть

Масса навески порошка железа для прессования образца с круглым сечением и высотой 10 мм рассчитывается по формуле (1):

$$m = \rho_k * V_{пр} * \theta * k_1 * k_2. \quad (1)$$

Прессование 12 образцов (6 цилиндрических, 6 брусков) из порошка железа проведено при давлении прессования, равном 300 МПа. Перед прессованием полость матрицы протирают и смазывают спиртовой суспензией стеарата цинка, что повторяют после каждого цикла прессования.

Результаты измерений массы, геометрических размеров и расчетов плотности и пористости цилиндрических образцов приведены в таблице 1, для брусков – в таблице 2. Исходя из пористости железных брикетов, определено количество меди, необходимое для заполнения пор на 15, 25, 50, 75 и 100 % с помощью пропитки. Образцы из навесок медного порошка спрессованы в тех же пресс-формах под давлением 300 Мпа.

Таблица 1 – Параметры железных цилиндрических образцов до спекания

Образец	d, мм	h, мм	m, г	V, см <sup>3</sup>	$\rho_{обр}$ , г/см <sup>3</sup>	П, %	V <sub>пор</sub> , см <sup>3</sup>	Cu, %	V <sub>Cu</sub> , см <sup>3</sup>	m <sub>Cu</sub> , г
1	19,86	9,8	19,05	3,034	6,28	20,2	0,613	15	0,092	0,82

2	19,57	9,41	19,05	2,83	6,56	16,65	0,471	25	0,118	1,05
3	19,85	9,66	19	2,98	6,36	19,19	0,572	50	0,286	2,55
4	19,95	9,77	18,95	3,05	6,54	16,9	0,515	75	0,387	3,44
5	20,12	9,96	19,05	3,165	5,66	28,1	0,889	100	0,889	7,92
6	19,93	9,96	19,2	3,106	6,18	21,5	0,668	0	0	0

Таблица 2 – Параметры и свойства цилиндрических образцов после спекания и пропитки медью

Образец	d, мм	$\Delta d, \%$	h, мм	m, г	V, см <sup>3</sup>	$\rho_{обр}, \text{г/см}^3$	d <sub>нв</sub> , мм	HВ <sub>ср</sub>
1	20,25	-1,96	10,34	20,96	3,328	6,298	2,2 2,3	59,568
2	20,14	-2,91	10,08	21,93	3,209	6,834	2,3 2,1	62,47
3	20,55	-3,53	10,16	23,595	3,368	7,006	2,1 2,1	68,905
4	20,18	-1,15	10,18	25,495	3,254	7,835	1,6 1,9	100,744
5	20,55	-2,14	10,26	26,915	3,401	7,914	1,7 1,9	95,038
6	19,85	0,4	10,17	19,855	3,146	6,311	3,2 3,1	28,523

Графики полученных результатов представлены на Рис. 1 - Рис. 3.

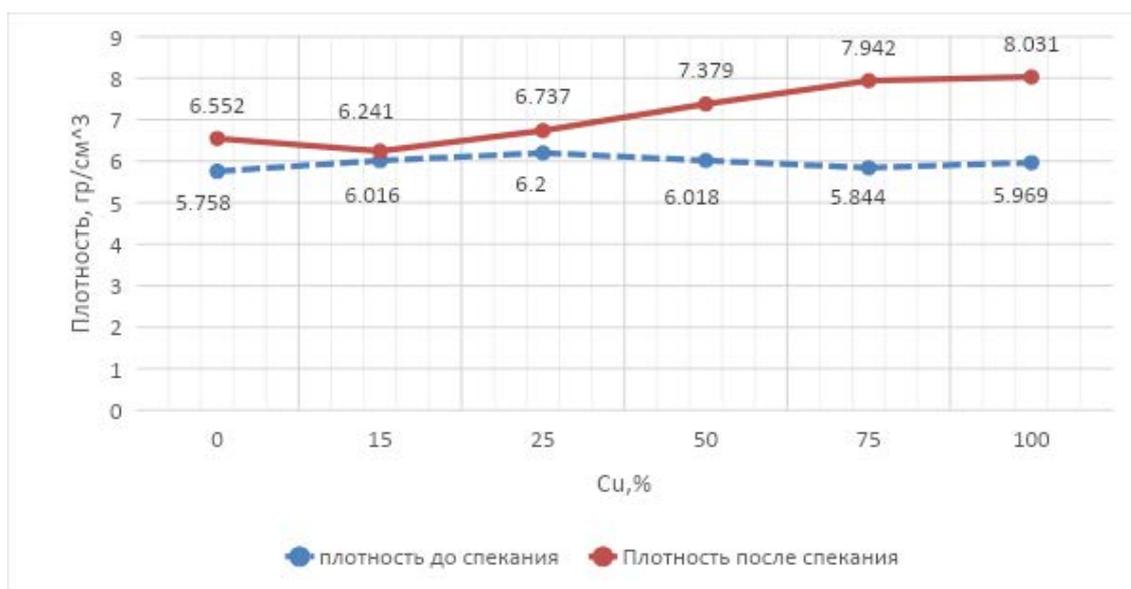


Рис. 1 Зависимости плотности от % содержания меди.

Авторская  
разработка

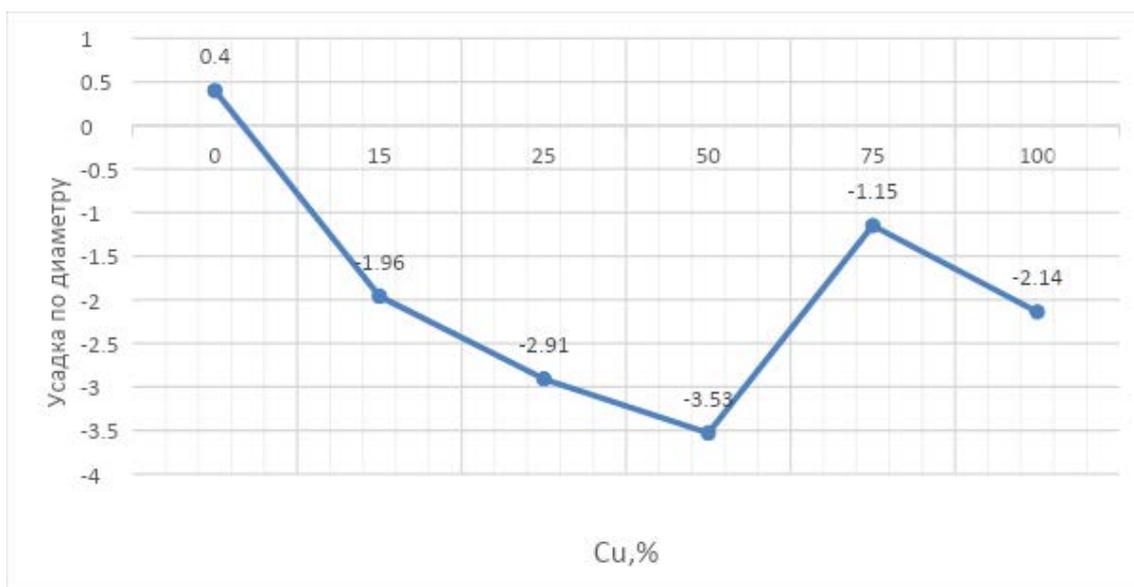


Рис. 2 Зависимость усадки по диаметру от % содержания меди

Авторская разработка

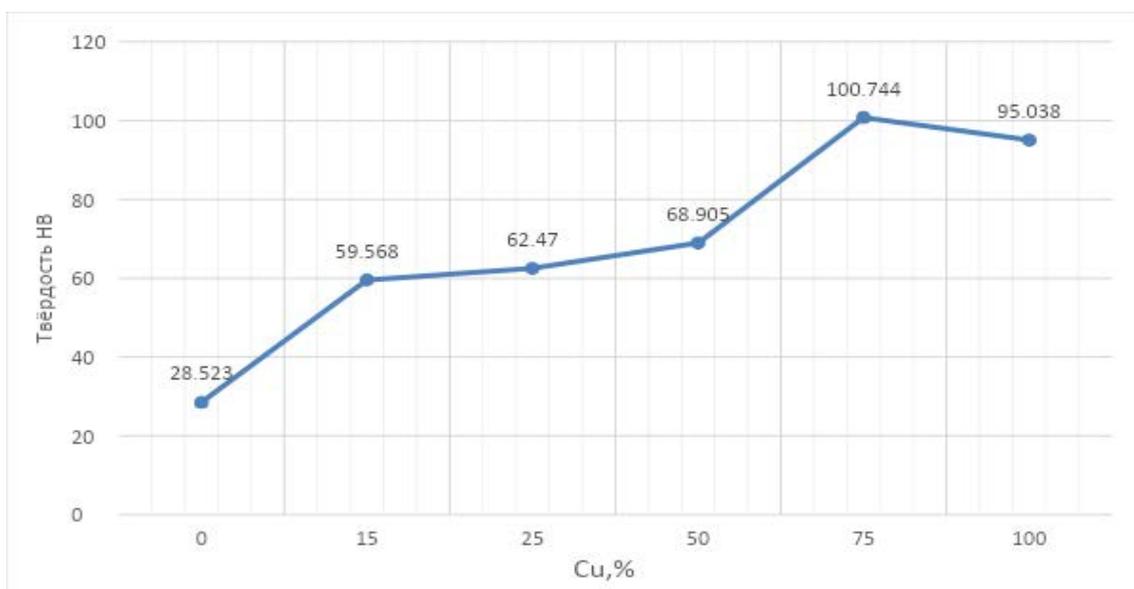


Рис. 3 Зависимость твердости от % содержания меди

Авторская разработка

Брикеты меди укладываются поверх прессовок из железного порошка, и затем при температуре 1100-1150 °С проведено спекание, совмещенное с пропиткой. Результаты измерений полученных образцов, а так же их плотность и усадка приведены в таблице 3 – для цилиндрических образцов, в таблице 4 –

для прямоугольных брусков. Твердость определяется методом Бринелля (шарик диаметром 5 мм, нагрузка 2452 Н), электропроводность - с помощью мультиметра и расчета [2].

Таблица 3 – Параметры железных прямоугольных брусков до спекания

Образец	b, мм	h, мм	l, мм	m, г	V, см <sup>3</sup>	$\rho_{обр}$ , г/см <sup>3</sup>	П, %	V <sub>пор</sub> , см <sup>3</sup>	Сu, %	V <sub>Сu</sub> , см <sup>3</sup>	m <sub>Сu</sub> , г
1	6,3	4,73	50,2	9	1,496	6,016	23,56	0,352	15	0,0528	0,47
2	6,2	5,1	50,2	9,85	1,587	6,2	21,22	0,338	25	0,072	0,752
3	6,22	4,93	50,13	9,25	1,537	6,018	23,53	0,362	50	0,181	1,61
4	6,4	5,26	50,32	9,9	1,694	5,844	25,73	0,436	75	0,327	2,91
5	6,3	5,33	50,4	10,1	1,692	5,969	24,15	0,409	100	0,4086	3,64
6	6,35	5,4	50,39	9,95	1,728	5,758	26,84	0,464	0	0	0

Таблица 4 – Параметры и свойства прямоугольных брусков после спекания и пропитки медью

Образец	b, мм	h, мм	l, мм	m, г	V, см <sup>3</sup>	$\rho_{обр}$ , г/см <sup>3</sup>	R, мОм	p, мОм*м	h, мм	P, кН	$\sigma$ , МПа
1	6,36	6,22	50,62	12,19 5	2,002	6,241	0,218	0,1704	1,6	0,75	182,884
2	6,19	6,2	50,55	13,07	1,94	6,737	0,194	0,1473	1,8	1,21	305,114
3	6,22	6,17	50,54	14,31 5	1,94	7,379	0,144	0,1093	2,4	1,42	359,815
4	6,29	6,06	50,56	15,30 5	1,927	7,942	0,1	0,0754	4,6	1,95	506,512
5	6,41	6,31	51,04	16,57 5	2,064	8,031	0,092	0,0729	4,6	2,39	561,866
6	6,1	5,99	49,91	11,95	1,824	6,552	0,203	0,1486	2,4	0,52	142,55

Графики полученных результатов представлены на Рис. 4 - Рис. 6.



Рис. 4 Зависимость плотности от % содержания меди  
Авторская разработка

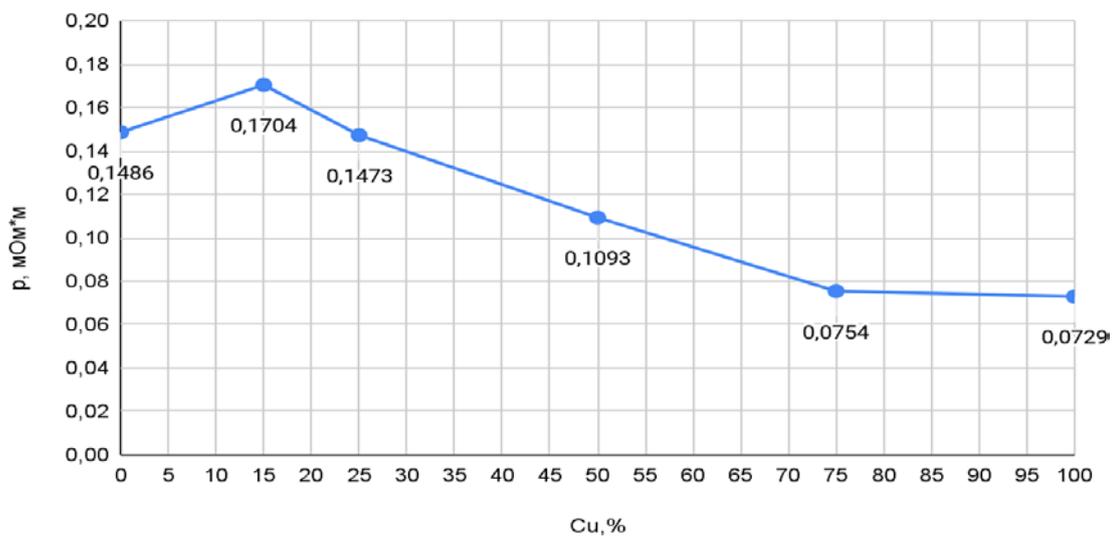


Рис. 5 Зависимость электропроводности (удельного сопротивления) от % содержания меди  
Авторская разработка

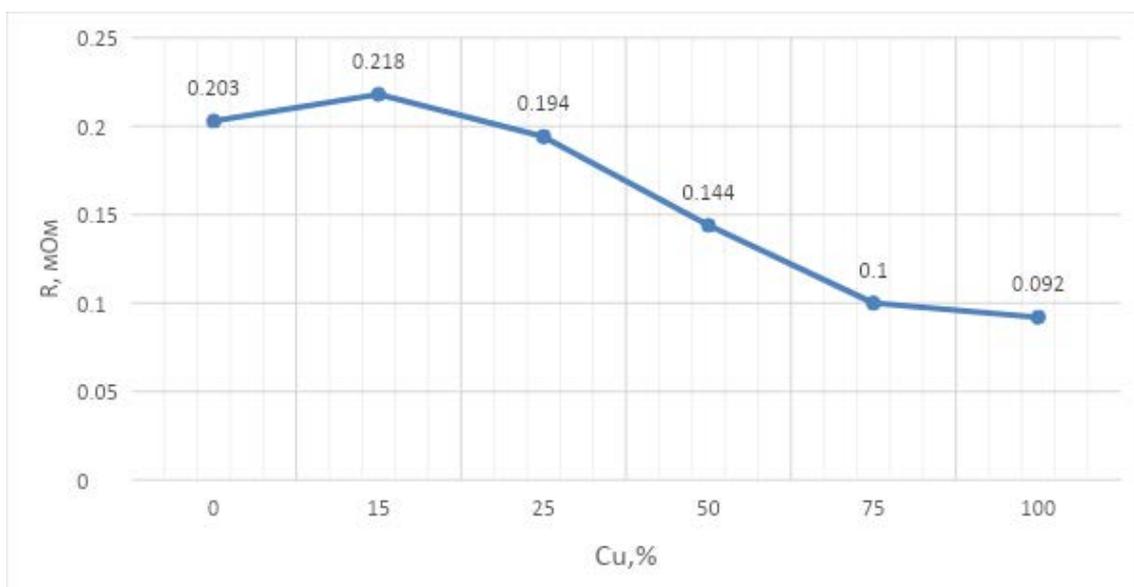


Рис. 6 Зависимость сопротивления от % содержания меди  
Авторская разработка

### Заключение

В ходе работы сделаны образцы псевдосплава железо-медь. Проведена оценка влияния процентного содержания меди на свойства композита Fe-Cu. В результате расчетов, можно сделать вывод, что повышение содержания меди в композиционных материале улучшает его прочностные свойства и повышает электропроводность. Медь заполняет собой поры в железе, повышая плотность и твердость материала.

Публикация подготовлена в рамках образовательной программы ПНИПУ по учебной дисциплине [5].

**Библиографический список**

1. Андреева А.В. Основы физикохимии и технологии композитов. Учеб. пособие для вузов / А.В. Андреева - М.: ИПРЖР, 2001. - 192 с.
2. Арзамасов В.Б., Волчков А.Н., Головин В.А. и др. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебник для студентов высших учебных заведений / В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин и др. - М.: Издательский центр «Академия», 2007. - 446 с.
3. Кульметьева В.Б., Порозова С.Е., Сметкин А.А. Перспективные композиционные и керамические материалы / В.Б. Кульметьева, С.Е. Порозова, А.А. Сметкин. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. - 276 с.
4. Порошковые материалы и области их применения [Электронный ресурс]. — Режим доступа — URL: [https://www.metotech.ru/art\\_poroshki\\_7.html](https://www.metotech.ru/art_poroshki_7.html) (Дата обращения 01.12.23)
5. Чекалкин А.А., Палкин Д.Д. Строительная механика, динамика и устойчивость композитных конструкций: учебное пособие / А.А. Чекалкин, Д.Д. Палкин. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. - 230 с.

*Оригинальность 87%*