

### Ədəbiyyat

1. Q.M. İmamverdiyev. Optik diapozonlu lazer rabitə sistemləri. Bakı-2016., s. 196.
2. B.Q. İbrahimov. Elektrik rabitə nəzəriyyəsi. Bakı-2009., səh 500.
3. İ.N. Dəvrişova. Optoelektron və kvant cihazları və qurğuları. Bakı-2014., s. 614.

Tövsiyyə edib: t.e.d., prof. **Z.Z. Şərifov**

УДК 621.762.5

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ОКСИДИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

**Джафарова А.А.**

*Азербайджанский Технический Университет  
Аз1073, г. Баку, пр. Г.Джавида, 25  
E-mail: [ariff-1947@mail.ru](mailto:ariff-1947@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований по созданию порошковых герметичных материалов путем применения химико–термической обработки (ХТО), а именно различных методов оксидирования спеченных железографитовых и железомедь-графитовых заготовок. После холодного прессования и спекания порошковых железографитовых и железомедьграфитовых материалов, эти материалы подвергнуты оксидированию в среде перегретого пара при 570°C. Установлено, что при пароксидировании на поверхности деталей преимущественно образуется наиболее плотный оксид типа Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Построена модель «залечивания» поры при оксидировании порошкового материала. С целью улучшения износостойкости рабочей поверхности оксидированных цилиндрических деталей исследовано влияние электромеханической обработки (ЭМО) на их структуру и твердость. Показано преимущество ЭМО для измельчения структуры и повышения твердости рабочей поверхности оксидированных деталей.

**Abstract.** In the article results of researches on creation of powder hermetic materials by application of chemical heat treatment (HTO), namely various methods of oxidation of sintered iron - graphite and iron - graphite billets are presented. After cold pressing and sintering of powder iron-graphite and iron-graphite materials, these materials are oxidized in a superheated steam environment at 570°C. It is established that the most dense oxide of the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> type is mainly formed on the surface of the parts during poroxidation. The model of "healing" of the pore is constructed in the oxidation of powder material. With the purpose of improving the wear resistance of the working surface of oxidized cylindrical parts, the influence of electromechanical processing (EMO) on their structure and hardness was studied. The advantage of EMO is shown for grinding the structure and increasing the hardness of the working surface of oxidized parts.

**Xülasə.** Məqalədə kimyəvi–termiki emalı (KTE), məxsusi olaraq dəmirqrafit və dəmirmisqrafit pəstahların müxtəlif oksidləşdirmə metodlarını tətbiq etməklə ovuntu hermetik materialların yaradılması üzrə tədqiqatların nəticələri verilib. Ovuntu dəmirqrafit və dəmirmisqrafit materialların soyuq presləmə və bişirilməsindən sonra, bu materiallar ifrat qızdırılmış buxar mühitində 570°C-də oksidləşdirilməyə məruz edilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, detalların səthində, əsasən Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> tipli sıx oksid yaranır. Oksidləşdirilmiş ovuntu materialının məsamələrinin “müalicə” modeli qurulmuşdur. Silindrik detalların oksidləşdirilmiş işçi səthinin yeyilməyə dözümlüyünü yaxşılaşdırmaq məqsədilə onların struktur və bərkliyinə elektromexaniki

*emalın (EME) təsiri tədqiq olunmuşdur. Oksidləşdirilmiş detalların işçi səthinin strukturunun xırdalanmasında və bərkliyinin artırılmasında EME-in üstünlüyü göstərilmişdir.*

**Ключевые слова:** *железографит, железомедьграфит, порошковые материалы, оксидирование, электромеханическая обработка.*

**Key words:** *iron-graphite, iron-graphite, powder materials, oxidation, electromechanical processing.*

**Açar sözlər:** *dəmirqrafit, dəmirmisqrafit, ovuntu materialları, oksidləşdirmə, elektromexaniki emal.*

---

**Введение.** Анализ литературы показывает, что среди методов оксидирования пористых порошковых изделий наиболее перспективным и экономически выгодным является паротермическое оксидирование. Однако широкому применению паротермического оксидирования явно не соответствует крайне малая информация об этом процессе: о нем практически нет упоминаний в учебниках по порошковой металлургии для вузов, полностью отсутствуют или ограничены двумя-тремя строками сведения в справочниках и монографиях по порошковой металлургии. Особый дефицит ощущается в публикациях о практике паротермического оксидирования [1,2].

В литературе отсутствуют также публикации по разработке оксидированных износостойких порошковых сталей, получаемых из относительно дешевых низколегированных порошков на основе железа, которые могли бы быть использованы для производства деталей бытовой техники традиционными методами порошковой металлургии. Эти материалы должны сочетать хорошую обрабатываемость при высоких скоростях резания, высокую износостойкость, газонепроницаемость, достаточную механическую прочность, способность удержания поверхностью жидкостной смазки [3,4].

**Материалы и методики проведения экспериментов.** Для исследований были использованы следующие материалы: порошки железа ПЖ2М3 ГОСТ 9849-86, меди ПМС2 ГОСТ 4960-75, стеариновоокислого цинка для парфюмерно-косметической промышленности марки ЧТУ 6-99-94-73-77 (все производство Российской Федерации) и графита марки ГК-3 ГОСТ 17022-76 (Украина). Были приготовлены шихты, состоящие из этих порошков в следующих пропорциях мас %: порошок меди - 0÷4,5; порошок графита - 0÷3,0; порошок железа – остальное. В качестве технологической смазки в шихты был добавлен стеарат цинка в количестве - 0,8 мас %. Смешивание порошков производилась в У – образном смесителе в течение 3,6 кс. Прессование шихт осуществляли при давлениях 400, 700, 1000 МПа на гидравлических прессах НРМ – 100 S. Спекание прессовок проводили в печи непрерывного действия «KOYO LINDBERG» при температурах 1100-1150<sup>0</sup>С. Паротермическое оксидирование деталей проводили в печи «ELINO» по специальному режиму при температуре 570<sup>0</sup>С. Кроме того, проводили оксидирование на воздухе при 600<sup>0</sup>С.

Плотность и пористость образцов определяли по стандартным методикам, а герметичность деталей под давлением 1,0 МПа с применением специального приспособления. Механические свойства образцов, в том числе твердость, прочность, ударную вязкость определяли по стандартным методикам с применением специального приспособления на растяжение.

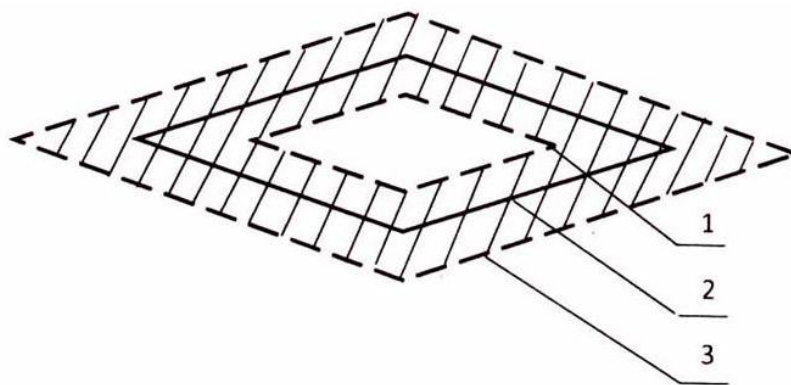
Микроструктурный, химический и фазовый анализы выполняли стандартными методами. Исследование микроструктуры спеченных оксидированных и электромеханически обработанных (ЭМО) образцов проводили на металлографическом микроскопе «PME OLYPMUS» (Япония). Фазовый анализ проводили на аппарате ДРОН-2 на отфильтрованном железном излучении.

Триботехнические характеристики порошковых образцов изучали на призматических образцах по схеме «вал-колодочка» в условиях сухого и жидкостного трения при постоянной скорости скольжения (2 м/с) и изменении нагрузки трения (2,4,6,8 МПа).

**Основная часть работы.** Разработаны технологические процессы получения порошкового железомедьграфита спеканием, спеканием и пароокислением. Легирование железомедьграфита медью приводит к увеличению прочностных свойств образцов. Однако при более высоком содержании углерода (3,0% мас.%) прочность при растяжении спеченных образцов снижается, тогда, как с увеличением содержания меди она монотонно повышается. После пароокисления картина существенно меняется, т.е. образцы ведут себя по-разному в зависимости от увеличения содержания меди, что связано с дисперсионным твердением за счет включений меди.

Показана перспективность использования окисленных спеченных медистых сталей. Установлено, что пористость как исходных, так и окисленных железомедных образцов с ростом содержания меди возрастает практически линейно. Влияние углерода на прочность спеченных и окисленных медистых сталей носит экстремальный характер с минимумом при 3% углерода. Составлена упрощенная модель «залечивания» пор в спеченной стали в процесс окисления, расчеты по которой показали, что за 1 час обработки водяным паром при 575<sup>0</sup>С на поверхности поры образуется защитные пленки Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> толщиной около 40 мкм.

С учетом того, что при проведении парового окисления при температуре водяного пара менее 575<sup>0</sup>С образуется оксид Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, также приняв по упрощенной модели, что поры являются сплюснутыми (справедливо для холодного прессования брикетов) и имеют ромбическое сечение с диагоналями 60 и 20 мкм, можно ориентировочно рассчитать толщину образцов оксидной пленки. Расчеты показывают, что при снижении пористости в результате окисления на 2% (при исходной пористости 12%) толщина образовавшейся пленки Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> составляет примерно 20 мкм. Такие пленки относятся к толстым и значительно повышают коррозионную стойкость металлов. Одновременно происходит значительное «залечивание» поры в результате увеличения объема при образовании Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> из железа в соответствии со схемой, показанной на рис. 1.

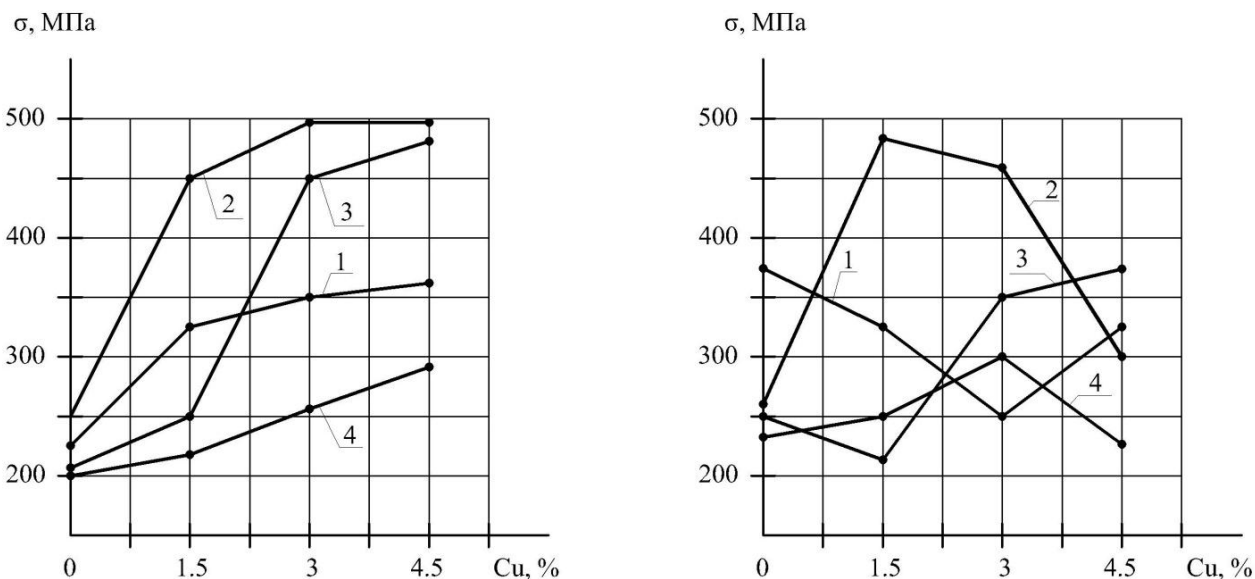


**Рис. 1.** Схема «залечивания» поры при окислении стали:

*1 - поверхность поры после окисления; 2 – то же, до окисления; 3 - поверхность проникновения кислорода. Заштриховано проникновение образовавшейся Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.*

Таким образом, порошковые окисленные медистые стали будут иметь повышенные антикоррозионные характеристики и могут использоваться в средах с повышенной влажностью, повышенным содержанием CO<sub>2</sub> и других [7,8].

Увеличение содержания меди в шихте существенно повышает прочность при растяжении ( $\sigma_B$ ) спеченных образцов (рис.2, а). Причем наиболее активное действие меди обнаруживается при содержании углерода близким к эвтектоидному составу стали (0,8-1%С). При отсутствии углерода в составе влияние меди на упрочнение материала в процессе спекания не столь существенно.



**Рис. 2.** Зависимость прочности при растяжении спеченных (а) и пароксидированных (б) образцов от содержания порошков графита и меди в шихте. 1,2,3,4 – содержание графита соответственно. 0; 1,0; 2,0; 3,0 мас.%.

В дальнейшем рассматривалось влияние методов оксидирования на структуру и свойства пористых железомедьграфитовых материалов. Отмечается, что получение пористых порошковых материалов с гетерогенной структурой возможно не только легированием основы материала, но и проведением дополнительной химико-термической обработки, например, оксидирования. При этом наиболее оптимальной операцией является оксидирование в среде перегретого пара при температуре 570<sup>0</sup>С.

После паротермического оксидирования микроструктура легированного медью и графитом материала претерпевает значительные изменения. При этом дисперсность перлита увеличивается, цементитная сетка, образованная по границам частиц и вблизи пор, разрывается. В порах и поровых каналах появляются оксидные включения, которые закупоривают дренажные каналы, и обеспечивают герметичность детали.

Оксидированный материал марки ЖГр1,5Д2 обладает весьма высокими износостойкостью и чистотой поверхности при трении без смазки со скоростью скольжения до 50 м/с на воздухе. Это позволяет рекомендовать его в качестве материала торцевого уплотнения, работающего в жидких и газообразных газовых средах в условиях высокой герметичности.

Оксидированный материал марки ЖГр0,8 при работе без смазки обладает высокой износостойкостью только при малых (0,2-0,3МПа) нагрузках.

Образование изнашивающихся пятен позволяет предположить, что в месте контакта антифрикционного материала с контролем торцевого уплотнения может находиться пластифицированная пленка, а это существенно снижает теплонагруженность торцевого уплотнения и увеличивает ресурс его работы.

Антифрикционные свойства пароксидированных железографитовых и железомедьграфитовых материалов при сухом трении представлены в таблице.

Интенсификация процесса износа пористого материала при трении в жидких агрессивных средах происходит, во первых, за счет электрохимической реакции  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$ , во вторых, вследствие разупрочнения материала в результате анодного процесса на межчастичных контактах.

Изучение износостойкости оксидированных порошковых материалов в условиях сухого трения показало, что процесс приработки антифрикционной пары совмещается с образованием пленок меди на поверхности железной матрицы. С увеличением пути трения приблизительно через 300-400 м наступает дополнительное окисление материала.

Таблица

Антифрикционные свойства оксидированных железографитовых материалов при торцовом трении в паре со сталью 45 в атмосферном воздухе и скорости скольжения 55 м/с

Марка материала	Нагрузка трения, Р, МПа	Интенсивность износа $J \cdot 10^{-8}$	Весовой износ $10^{-9}$ , мг/мм	Коэффициент трения, f	Удельный тепловой поток $q$ , МВт/м <sup>2</sup>
ЖГр1,5Д2	0,4	0,15	0,09	0,16	0,90
	0,5	1,4	2,4	0,13	1,35
	0,6	18,0	4,2	0,11	1,95
ЖГр0,8	0,4	0,70	2,3	0,20	0,90
	0,5	1,5	2,5	0,14	1,35
	0,6	10,0	45,0	0,25	до 3,5

*Примечание. В таблице и тексте интенсивность износа линейная - безмерная величина.*

Несколько по-иному ведут себя образцы, подвергнутые оксидированию в обычной атмосфере при 600<sup>0</sup>С. Деформация поверхностных слоев менее плотных оксидов типа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вызывает некоторое их смещение в направлении силы трения и, как следствие, образование плавного завала частицы и «хвостов». Относительно большой износ этих образцов связан с меньшим содержанием в их структуре твердых оксидов типа Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, которые защищают частицы от деформации и износа.

С целью повышения износостойкости рабочей поверхности деталей из разработанных материалов - железомедьграфитов, они были подвергнуты электромеханической обработке. Разработана электромеханическая установка, которая вмонтирована на токарном станке. Установлено, что после ЭМО на оксидированной поверхности образцов появляется светлый натравляющийся слой, который является результатом закалки этого слоя при интенсивном отводе тепла внутрь холодной детали, поэтому структура поверхностного слоя состоит из бесструктурного мартенсита, который образуется в особых условиях - при высоких давлениях и скоростных превращениях [9,10].

Установлено, что ЭМО оксидированных порошковых изделий позволяет увеличить плотность, изменить структуру (рис. 3), в два и более раза повысить твердость (по сравнению с исходной) поверхностного слоя (рис. 4). Значительно уменьшается шероховатость поверхности (рис. 5). На основании проведенных исследований были установлены оптимальные режимы обработки для роликов насосного узла ротационного компрессора плотностью 6,7 г/см<sup>3</sup>: J=550-600А; Р =1500Н; n=60-100 об/мин и S =0,12 мм/об.

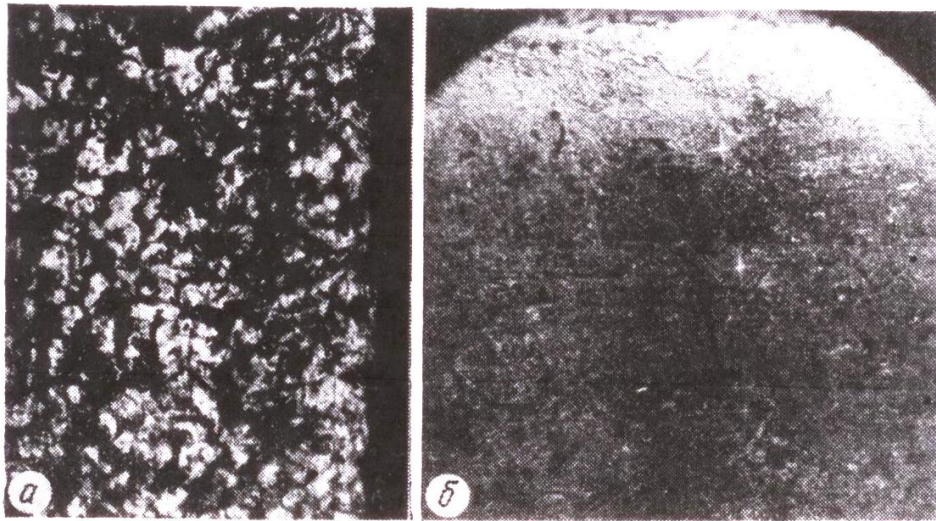


Рис. 3. Структура оксидированных железомедьграфитов: а - до ЭМО, х160; б - после ЭМО, х800.

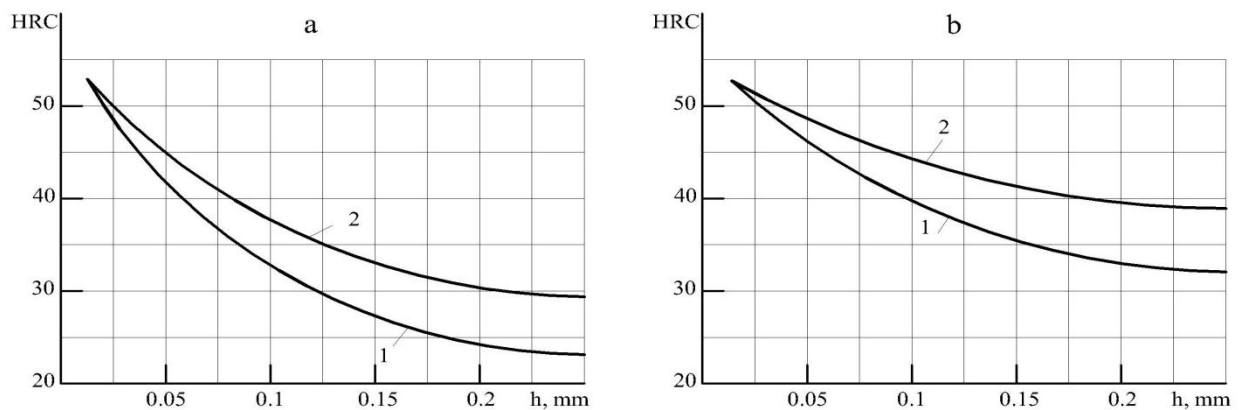


Рис. 4. Изменение твердости по глубине поверхностного слоя.

а) 1-550; 2-750А;  $\rho=6,8\text{г/см}^3$ ;  $n=100\text{об/мин}$ ;  $S=0,12\text{мм/об}$ ;  $P=550\text{Н}$ ;  
 б) 1 -  $\rho-5,3$ ; 2 -  $6,25\text{ Г/см}^3$ ;  $J=750\text{А}$ ;  $n=60\text{об/мин}$ ;  $S=0,12\text{ мм/об}$ ;  $P=1500\text{Н}$



Рис. 5. Профилограммы поверхностей спеченных роликов: а - до; б - после ЭМО.

**Выводы:** 1. Определены возможности и перспективы реализации различных процессов оксидирования пористых материалов на основе железа, обеспечивающих гетерогенность их

структуры и придающих им достаточно высокие физико–механические и триботехнические свойства.

2. Построена упрощенная модель схемы «залечивания» поры при оксидировании железистографитовых порошковых материалов. Показано, что поры при холодном прессовании являются сплюснутыми, имеют ромбическое сечение. Данная модель позволяет рассчитывать толщину образцов оксидной пленки.

3. Проведена электромеханическая обработка оксидированных рабочих поверхностей детали типа ролик плотностью  $6,7 \text{ г/см}^3$  при следующих режимах:  $J=550-600 \text{ А}$ ;  $P=1500 \text{ Н}$ ;  $n=60-100 \text{ об/мин}$  и  $S=0,12 \text{ мм/об}$ . Установлено, что после ЭМО структура поверхности резко измельчается и состоит из бесструктурного мартенсита.

### Литература

1. Мамедов А.Т. Порошковые материалы конструкционного и антифрикционного назначения, Баку, Элм, 1991, 188 с.
2. Мамедов А.Т., Мамедова А.А. Легированные порошковые материалы на основе железа, подвергаемые оксидированию / Материалы докладов международной научно – технической конференции «Проблемы машиностроения на пороге XXI века», Баку, 2000, с. 95-98.
3. Мамедов А.Т. Конструкционные и антифрикционные порошковые материалы, Баку, Элм, 2006, 458 с.
4. Джафарова А.А., Иманова Р.А. Влияние пористости оксидированных порошковых материалов на основе железа на их триботехнические характеристики//Вісник Національного технічного Університету “ХПІ”, г. Харьков, 2016, №4, (1176), с. 7-10.
5. Намазов С.Н., Джафарова А.А., Кахраманов В.Ф. Структурные характеристики порошкового железистографита с последующим оксидированием//Сборник трудов VII международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении». г. Томск, 19-21 мая 2016 года, с. 91-94.
6. Джафарова А.А., Иманова Р.А. Твердость и микроструктура железистографита, подвергнутого оксидированию // Ученые записки АзТУ, 2016, №4, с. 89-98
7. Джафарова А.А., Иманова Р.А. Механические свойства спеченного и порооксидированного железомедьграфита//Журнал «Машиноведение» АзТУ, 2016, №1, с. 36-40.
8. Джафарова А.А. Износостойкость спеченных порошковых материалов на основе железа//Ученые записки Азербайджанской Государственной Морской Академии, 2017, №1, с. 51-55.
9. Намазов С.Н., Джафарова А.А., Абдулазимова Е.А. Легирование порошковых материалов на основе железа, подвергаемых оксидированию // «Металлургическая и горнорудная промышленность», г. Днепр. 2017, №2, с. 38-40.
10. Джафарова А.А., Иманова Р.А. Исследование влияния электромеханической обработки пареообработанных изделий из железистографитовых порошковых материалов на их свойства/Материалы 2-ой научно – технической конференции «Проблемы металлургии и материаловедения», 2017, с. 224-226.

Tövsiyyə edib: t.e.d., prof. **Z.Z. Şərifov**