

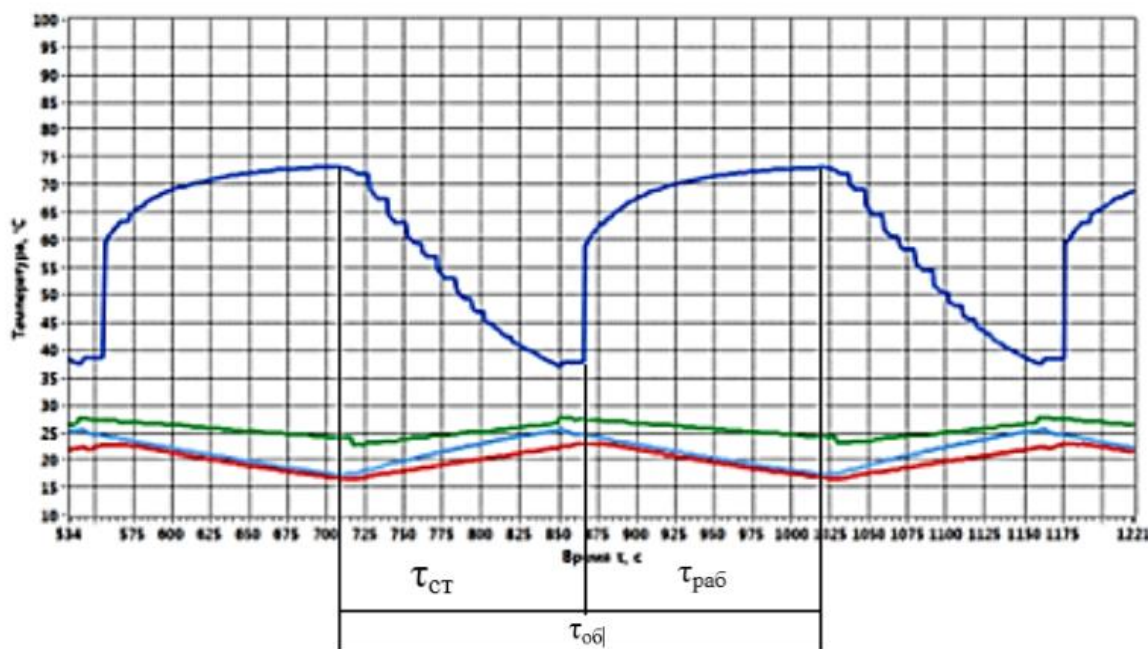


Рисунок 3. График изменения рабочих температур с анализом режима работы.

Литература

В.В.Галаган. Методические рекомендации по изучению реверсивного теплового насоса: Орел ГТУ, 2019. – 94 с.

Лосюк Ю. А Лабораторные работы на стенде Тепловые насосы Минск: БНТУ, 2013. – 50 с.

УДК 519.673
ГРНТИ 27.35.33

Малеронок¹ В. В.

¹ Старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроения, магистр технических наук, соискатель. Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 561 28 88

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ОТ РАЗМЕРОВ ЗЕРЕН КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Maleronok¹ V. V.

¹ Senior lecturer of the department of Technology and Machine-Building Equipment, master of technical sciences, graduated from graduate school. Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 5612888

MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT OF METAL PRODUCTS ELECTRICAL RESISTANCE HARDENED LAYER DEPENDENCE ON THE SIZES OF CRYSTAL STRUCTURE GRAINS

Аннотация. В статье описывается разработка математической модели зависимости электросопротивления упрочненного слоя быстрорежущего инструмента от количества зерен структуры металла, которая изменяется под действием магнитно-импульсной обработки. Разработанная математическая модель получена в результате рассмотрения упрочненного слоя, как наноматериала с рядом известных зависимостей. Такое сравнение принято в связи с тем, что согласно ГОСТ 19265-73,

ГОСТ 5639-82 размер зерна структуры металла быстрорежущего инструмента (сталь Р6М5) уже составляет единицы микрометров, а в процессе обработки магнитно-импульсным воздействием уменьшается до нанометрового диапазона.

Числовое моделирование реализовано с применением математического пакета MATLAB R2019b, а результат получен в виде графика зависимости. Что позволило установить влияние количества межзеренных границ разделов на электросопротивление, представляющих собой совокупность границ зёрен и тройных стыков. Так, наибольший прирост электросопротивления происходит в нанометровом диапазоне размеров зерен структуры металла от 0,2 нм до 0,01 нм.

Abstract. The article describes the mathematical model development dependence of the hardened layer electrical resistance of a quick cutting tool on the number of the metal structure grains, which changes under the influence of magnetic pulse processing. The developed mathematical model is obtained by considering the hardened layer as a nanomaterial with a number of known dependencies. Such a comparison is taken due to the fact that, according to GOST 19265-73, GOST 5639-82, the grain size of the metal structure of a high-speed tool (P6M5 steel) is already a few micrometers, and it decreases to the nanometer range in the process by magnetic pulse exposure.

Numerical modeling is implemented using the mathematical package MATLAB R2019b, and the result is obtained in the form of a dependency graph. This made it possible to establish the effect of the grain boundaries number of the partitions on the electrical resistance, which is a combination of grain boundaries and triple joints. So, the largest increase in electrical resistance occurs in the nanometer range of the metal structure grain sizes from 0.2 nm to 0.01 nm.

Ключевые слова: MatLab; математическая модель; быстрорежущий инструмент; упрочнение изделий; Р6М5; высокоэнергетические методы; магнитно-импульсная обработка; структура металла; электросопротивление; граница зерен металла; размер зерна металла.

Keywords: MatLab; mathematical model; high-speed tool; hardening of products; P6M5; high energy methods; magnetic pulse processing; metal structure; electrical resistance; metal grain boundary; grain size of the metal.

ВЕДЕНИЕ

При проведении магнитно-импульсной обработки (МИО) на поверхности стального изделия образуется модифицированный слой толщиной до 70 мкм (для некоторых металлов и более). В этом слое устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла, что ведет к повышению прочностных показателей изделия, а в случае обработки режущего инструмента к повышению его стойкости [1].

Измельчение структуры (размера зерна) напрямую влияет на величину электрического сопротивления упрочненного слоя. А так как толщина упрочненного слоя составляет единицы и десятки микрометров, а размер зерна имеет микро и нанометровый диапазон, то исследование влияния размера зерна на электросопротивление удобно рассматривать по закономерностям, применяемым для наноматериалов.

В связи с этим, целью работы является получение математической модели зависимости электросопротивления упрочненного слоя от количества зерен структуры металла, которое изменяется под действием магнитно-импульсной обработки. Проведение числового моделирования актуально осуществить с применением математического пакета MATLAB R2019a, а результат получить в виде графика зависимости.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

За основу удобно взять зависимость электросопротивления от количества межзеренных границ разделов по формуле [2]:

$$R = R_0 + R_{ГР} \frac{S}{V}, \quad (1)$$

где R_0 – электросопротивление монокристаллического материала с заданным содержанием примесей и дефектов;

$R_{ГР}$ – электросопротивление на межзеренной границе;

S – площадь межзеренных границ;

V – объем.

Из этой зависимости следует, что общее сопротивление упрочненного слоя будет состоять из R_0 – электросопротивления монокристаллического материала и $R_{ГР} \frac{S}{V}$ – электросопротивления, вызванного увеличением количества межзеренных границ раздела связанного с уменьшением размера зерна D при упрочнении МИО.

Для начала рассмотрим размер скин-слоя (принимаем, что он равен толщине упрочненного слоя) относительно размеров цельного образца (рисунок 1), который возникает при прохождении тока высокой частоты [3].

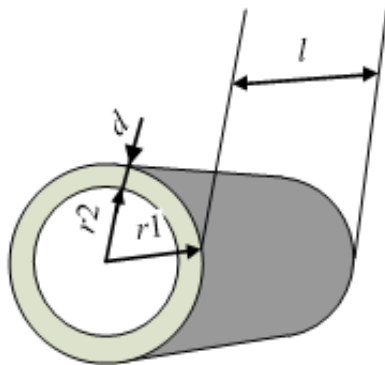


Рисунок 1 – Толщина скин-слоя d в цельноразмерном образце
Figure 1 – Skin-layer thickness d in solid sample

Из рисунка следует, что площадь сечения скин-слоя толщиной d можно найти как разность площадей образованных радиусами r_1 и r_2 :

$$S = S_1 - S_2 = \pi \cdot r_1^2 - \pi \cdot r_2^2 = \pi \cdot (r_1^2 - (r_1 - d)^2) = \pi \cdot (r_1^2 - (r_1^2 - 2 \cdot r_1 \cdot d + d^2)) = \pi \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2). \quad (2)$$

А объем скин-слоя длиной l в таком случае будет равен:

$$V = \pi \cdot l \cdot (r_1^2 - r_2^2) = \pi \cdot l \cdot (r_1^2 - (r_1^2 - 2 \cdot r_1 \cdot d + d^2)) = \pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2). \quad (3)$$

Тогда электросопротивления монокристаллического материала R_0 с учетом (2) можно найти по формуле:

$$R_0 = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{\rho \cdot l}{S_1 - S_2} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot r_1^2 - \pi \cdot r_2^2} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot (r_1^2 - (r_1^2 - 2 \cdot r_1 \cdot d + d^2))} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}, \quad (4)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала.

Для установления влияния количества межзеренных границ на электросопротивление ($R_{ГР} \frac{S}{V}$) необходимо найти S – площадь межзеренных границ. Она будет составлять закономерную долю от общей площади зерен:

$$S = \Delta V_{ГР} \cdot S_{\Sigma}, \quad (5)$$

где $\Delta V_{ГР}$ – объемная доля границ раздела;

S_{Σ} – суммарная площадь зерен.

Объемную долю границ раздела можно оценить по формуле[2]:

$$\Delta V_{ГР} = 1 - \left[\frac{(D-s)}{D} \right]^3, \quad (6)$$

где s – толщина границ раздела (порядка 1 нм),

D – характерный размер зерна или кристаллита.

Суммарную площадь зерен S_{Σ} можно найти, рассмотрев мелкодисперсное строение материала, свойственное после упрочнения МИО (рисунок 2).

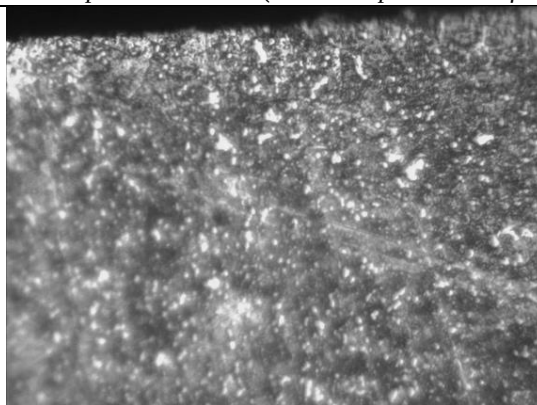


Рисунок 2 – Строение стали P6M5 после МПО

Figure 2 – The structure of steel P6M5 after magnetic pulse processing

Тогда, рассматривая зерно шарообразной формы диаметра D , суммарную площадь зерен S_{Σ} можно найти по формуле:

$$S_{\Sigma} = \pi \cdot D^2 \cdot N, \quad (7)$$

где D – размер зерна;

N – количество зерен.

Количество шарообразных зерен размера D в объеме V (3) скин-слоя толщиной d равно:

$$N = \frac{V}{V_{\text{зерна}}} = \frac{\pi \cdot l \cdot (r_1^2 - r_2^2)}{\frac{\pi \cdot D^3}{6}} = \frac{6 \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}{D^3}, \quad (8)$$

где D – размер зерна;

l – длина скин-слоя (образца);

d – толщина скин-слоя.

Тогда с учетом (8) уравнение (7) для определения суммарной площади зерен S_{Σ} примет вид:

$$S_{\Sigma} = \pi \cdot D^2 \cdot \frac{6 \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}{D^3} = \frac{6 \cdot \pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}{D} \quad (9)$$

С учетом (6,9) уравнение (5) для площади межзеренных границ S можно представить следующим образом:

$$S = \Delta V_{\text{ГР}} \cdot S_{\Sigma} = (1 - [\frac{(D-s)}{D}]^3) \cdot \frac{6 \cdot \pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}{D} = \frac{(D^3 - (D-s)^3) \cdot 6 \cdot \pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}{D^4} \quad (10)$$

Таким образом, подставляя формулы (3, 4, 10) количества межзеренных границ раздела (1), в уравнение зависимости электросопротивления от получим:

$$\begin{aligned} R &= R_0 + R_{\text{ГР}} \frac{S}{V} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)} + R_{\text{ГР}} \frac{(1 - [\frac{(D-s)}{D}]^3) \cdot \frac{6 \cdot \pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}{D}}{\pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)} = \\ &= \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)} + R_{\text{ГР}} \cdot \frac{(D^3 - (D-s)^3) \cdot 6 \cdot \pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}{D^4 \cdot \pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)} = \\ &= \frac{D^4 \cdot l^2 \cdot \rho + R_{\text{ГР}} \cdot 6 \cdot \pi \cdot l \cdot (D^3 - (D-s)^3) \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}{D^4 \cdot \pi \cdot l \cdot (2 \cdot r_1 \cdot d - d^2)}, \end{aligned} \quad (11)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала;

D – размер зерна;

l – длина скин-слоя (образца);

$R_{\text{ГР}}$ – электросопротивление на межзеренной границе;

s – толщина границ раздела;

r_1 – радиус образца;

d – толщина скин-слоя (упрочненного слоя).

Данную зависимость (11) можно считать математической моделью зависимости электрического сопротивления упрочненного слоя

металлических изделий от размера зерна кристаллической структуры.

Числовое моделирование зависимости электрического сопротивления упрочненного слоя металлических изделий от размеров зерен кристаллической структуры

Для проведения численного моделирования используем зависимость (11) для анализа влияния размера зерна D на электросопротивление упрочненного слоя R , исходя из данных, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Table 1

The source data for the calculation

Наименование величины	Значение
ρ – удельное электрическое сопротивление материала	Для стали Р6М5 порядка: $5,4 \cdot 10^{-7} [\text{Ом} \cdot \text{м}]$
D – размер зерна	Диапазон: $0,01 [\text{нм}] - 10 [\text{мкм}] = 1 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-5} [\text{м}]$
$R_{\text{ГР}}$ – электросопротивление на межзеренной границе	Типовое для нано и микроструктур: $3 \cdot 10^{-14} [\text{Ом} \cdot \text{м}]$
s – толщина границ раздела	Типовое для нано и микроструктур порядка: $1 [\text{нм}] = 1 \cdot 10^{-9} [\text{м}]$
r_1 – радиус образца	Типовое для сверл из стали Р6М5 по ГОСТ 10902-77: $0,005 [\text{м}]$
l – длина скин-слоя (образца)	Типовое для сверл из стали Р6М5 по ГОСТ 10902-77: $0,133 [\text{м}]$
d – толщина скин-слоя	Подбирается равным толщине упрочненного слоя и рассчитывается с учетом частоты f по формуле [4]: $d = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}}$, где ρ – удельное электрическое сопротивление материала; μ_m – относительная магнитная проницаемость; f – частота сигнала
μ_m – относительная магнитная проницаемость	Для углеродистой стали: 100
f – частота сигнала	Для повышения разрешающей способности выбрана: $5 [\text{МГц}] = 5 \cdot 10^6 [\text{Гц}]$
d – толщина скин-слоя с учетом f и μ_m	$1,65 \cdot 10^{-5} [\text{м}] = 16,5 [\text{мкм}]$

Моделирование выполнено с помощью программы MATLAB R2019b в окне Editor на языке Matlab (рисунок 3).

```

D = 0.01e-9:1e-12:10e-6;% диапазон изменения зерна
f = 5*10^6; % частота зондирующего сигнала
h = 0.133; % длинна образца
r1 = 0.005; % радиус образца
g = 3e-14; % электросопротивление границы зерна
s = 1e-9; % толщина границы раздела
q = 54e-8; % удельное электросопротивление стали Р6М5
m = 100; % относительная магнитная проницаемость углеродистой стали
d = 503.*(q./(m.*f)).^0.5; % толщина скин-слоя
V1 = 1-((D-s)./D).^3; % объемная доля границ раздела
V2 = (pi.*D.^3)/6;% объем шарообразного зерна
n1 = (pi*h*(2*r1*d-d^2))./V2; % количество шарообразных зерен в объеме
скин-слоя
S1 = pi.*(D.^2).*n1;% площадь всех шарообразных зерен в объеме скин-
слоя
R = ((D.^4)*(h^2)*q+g*6*pi*h.*(D.^3-(D-s).^3)*(2*r1*d- d^2))
./((D.^4)*pi*h*(2*r1*d-d^2));% зависимость электросопротивления от
размера зерна D
loglog (D, R) % вывод графика зависимости в логарифмическом масштабе

```

Рисунок 3 – Математическая модель зависимости электрического сопротивления R упрочненного слоя изделий из металлов от размера зерна D кристаллической структуры в среде Matlab

Figure 3 – A mathematical model of the dependence of the electrical resistance R of the hardened layer of metal products on the grain size D of the crystal structure in Matlab

Результаты моделирования, осуществленного с помощью программы MATLAB R2019b, представлены в виде графика (рисунок 4). Так как величина электросопротивления многократно

изменяется в диапазоне изменения размера зерна, то зависимость удобно рассмотреть, если использовать логарифмический масштаб для обеих осей координат.

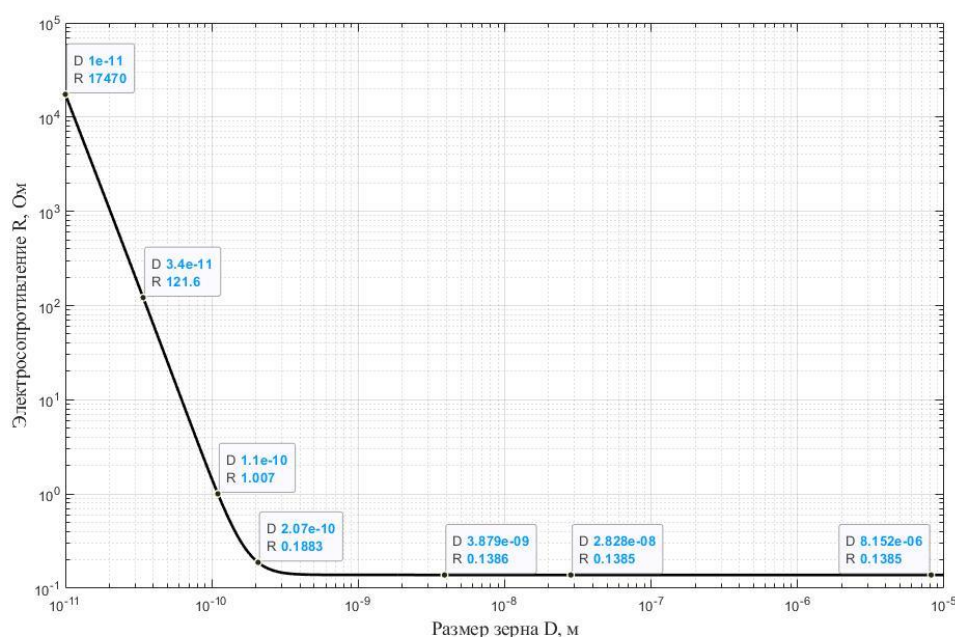


Рисунок 4 – График зависимости электрического сопротивления R упрочненного слоя изделий из металлов от размера зерна D кристаллической структуры

Figure 4 – Graph of the electrical resistance R of the hardened layer of metal products on the grain size D of the crystal structure

Результаты моделирования показывают, что сильный прирост электросопротивления характерен в нанометровом диапазоне. Так, например, при уменьшении зерна от 0,2 нм до 0,01 нм, электросопротивление изменяется от 0,1883 Ом до 17,5 кОм соответственно. А на диапазоне от 10 мкм до 0,2 нм электросопротивление прирастает незначительно от 0,1385 до 0,1883 Ом.

Таким образом, при проведении МИО изделий из металлов, которое в частности приводит к измельчению зерна до нанометров, будет происходить рост электрического сопротивления упрочненного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель зависимости электрического сопротивления упрочненного слоя металлических изделий от размеров зерен кристаллической структуры и произведен анализ в диапазоне от 0,01 нм до 10 мкм. Результаты моделирования показывают, что сильный прирост электросопротивления характерен в нанометровом диапазоне. Так, например, при уменьшении зерна от 0,2 нм до 0,01 нм, электросопротивление изменяется от 0,1883 Ом до 17,5 кОм соответственно. А на диапазоне от 10 мкм до 0,2 нм электросопротивление прирастает незначительно от 0,1385 до 0,1883 Ом.

Таким образом, осуществлять контроль изменения структуры металла при проведении магнитно-импульсной обработки быстрорежущего

инструмента можно не только с применением микроскопии, но и с использованием метода контроля, основывающегося на измерении электросопротивления поверхностного слоя. Что приведет к сокращению времени как на подготовку изделия к измерению, так и на сам процесс измерения.

Список цитированных источников

- Алифанов, А. В. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов, А. В. Акулов, Ж. А. Попова, А. С. Демянчик. — Литье и металлургия, 2012. — №3. — С. 77 — 82.
- Наноразмерные структуры: классификация, формирование и исследование: учебное пособие для вузов. / Е.В. Булыгина [и др.]. — М.: САЙНС-ПРЕСС, 2006. — 80 с.
- Малеронок, В.В. Метод исследования упрочненного слоя металлических образцов с использованием токов высокой частоты / А.В.Алифанов, В.В. Малеронок, И.А. Богданович // Вестник БарГУ. Серия технические науки. — 2019. — № 7. — С. 70 – 75.
- Шпиганович, А. Н. Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий / А. Н. Шпиганович, С. В. Довженко // Журн. науч. публ. аспирантов и докторантов. — 2008. — Режим

доступа:

<http://www.jurnal.org/articles/2008/elect7.html>. —

Дата доступа: 22.01.2020.

List of quoted sources

1. Alifanov, A.V. Magnetic-pulse hardening treatment of products made of structural and tool steels / A.V. Alifanov, A.V. Akulov, J.A. Popova, A.S. Demyanchik. - Casting and metallurgy, 2012. - №3. - p. 77 - 82.

2. Nanoscale structures: classification, research: textbook for universities. / E.V. Bulygin [et al.]. - M.: SAYNS-PRESS, 2006. - 80 P.

3. Maleronok, V.V. A method for studying a hardened layer of metal samples using high-frequency currents / A.V. Alifanov, V.V. Maleronok, I.A. Bogdanovich // Bulletin of BarSU. A series of technical sciences. - 2019. - №. 7. - p. 70 - 75.

4. Shpiganovich, A. N. Analysis of the influence of higher harmonic components on the reliability of electrical insulation coatings / A. N. Shpiganovich, S. V. Dovzhenko // Zhurn. scientific public graduate and doctoral students. - 2008. - Access mode: <http://www.jurnal.org/articles/2008/elect7.html>. - Access Date: 21.01.2020.

УДК 72:03,666.9.015

Забидулла Камилевич Бабаев

(автор для связи),

Кафедра «Химическая технология»,

Ургенчский Государственный университет

Хорезмская область, ул.Х.Алимджан, 14, Ургенч, Узбекистан, 220100

Шарофат Мухаммадовна Машиарипова

Хорезмская Академия Маъмуна,

Хорезмская область, Марказ-1, Хива, Узбекистан 220900

ОТХОДЫ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА КАК СЫРЬЁ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕСТАВРАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ

Zabibulla Kamilovich Babaev

(contact author),

Department of Chemical Technology,

Urgench State University,

Khorezm Region, 14 H. Alimjan St., Urgench, Uzbekistan, 220100

Sharofat Muhammadovna Masharipova

Khorezm Academy of Mamun,

Khorezm Region, Markaz-1, Khiva, Uzbekistan 220900

WASTE OF CERAMIC BRICK AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF RESTORATION MATERIALS OF ARCHITECTURAL MONUMENTS

Аннотация. Это статья об отходах керамического кирпича как сырья для производства реставрационных материалов архитектурных памятников. Данная работа посвящена изучению свойств отхода керамического кирпича как техногенного минерального сырья для повторного использования в производстве стеновых материалов.

Abstract. This article is about waste ceramic bricks as raw materials for the production of restoration materials for architectural monuments. This work is devoted to the study of the properties of waste ceramic bricks as man-made mineral raw materials for reuse in the production of wall materials.

Ключевые слова: керамический кирпич, промышленные отходы, сырьевая композиция, глина.

Key words: ceramic brick, industrial waste, raw material composition, clay.

ВВЕДЕНИЕ

Производство керамического кирпича в условиях Республики Узбекистан сопровождается образованием ряда отходов, вопрос утилизации которых до сих пор является не решённой задачей. К числу таких отходов относится бой керамического кирпича и шлаки, количество которых варьируется в пределах 10-15% и 8-12 % соответственно. Их до настоящего времени в основном вывозят на свалки твердых бытовых отходов, либо складывают в специальное отведенные места. При этом не только значительно увеличиваются объёмы свалок, также безвозвратно

теряется минеральное сырьё, ресурсы которого ограничены в условиях Хорезмского региона. Данная работа посвящена изучению свойств отхода керамического кирпича как техногенного минерального сырья для повторного использования в производстве стеновых материалов. Актуальность решения такой задачи обусловлена, с одной стороны, экологическими проблемами снижения ресурсоемкости стеновых материалов, с другой — вопросами социально-экономического развития региона.