

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ  
СПЕКАНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА СТРУКТУРУ  
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ**

**И. Г. Проценко<sup>1</sup>, Д. М. Мордасов<sup>1</sup>, Д. Е. Кобзев<sup>2</sup>**

*Кафедры: «Материалы и технология» (1); «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; iliaprocenko@rambler.ru*

**Ключевые слова:** высококоэрцитивная структура; карбонильные и электролитические порошки металлов; магнитные параметры; поликомпонентная шихта; температурно-временной режим спекания.

**Аннотация:** Рассмотрены температурно-временные режимы спекания порошковых постоянных магнитов, изготовленных из поликомпонентной шихты металлических порошков, полученных восстановлением из карбидов с помощью электролиза. Установлено, что в процессе спекания предварительно спрессованных порошковых постоянных магнитов из карбонильных порошков металлов образуется структура, содержащая в своем составе фазу, обогащенную углеродом, негативно влияющую на магнитные параметры материала. Представлено, что изменение температурно-временных режимов спекания, обеспечивающих удаление углерода из состава карбонильных порошков металлов, приводит к усложнению технологического процесса. Изучены режимы спекания изделий, спрессованных из порошковых материалов, полученных электролитическим способом. Установлено, что в ходе термического воздействия может быть сформирована оптимальная магнитная структура, обеспечивающая высокие значения магнитных параметров.

---

Магнитные материалы на основе Fe–Ni–Al–Co сплавов ЮНДК (сплав системы Fe–Ni–Al, легированный кобальтом), дополнительно легированные медью, кремнием, ниобием, находят применение во многих областях науки и техники. Использование данного вида материалов объясняется высоким значением их остаточной индукции и магнитной энергии, в сравнении с другими магнитными материалами. Преимуществом дисперсионно твердеющих сплавов системы ЮНДК является высокая температурная и временная стабильность магнитных параметров в интервале температур до 550 °С, а также высокие механические и технологические свойства. Особое место в данной группе сплавов занимают постоянные магниты, изготовленные с применением технологий порошковой металлургии.

Особенность металлокерамических постоянных магнитов заключается в высокой степени химической однородности, а также в возможности формирования изделий сложной формы. Порошковая технология позволяет исключить операцию механической обработки, что снижает вероятность образования механических дефектов и уменьшает затраты на производство [1, 2].

Наряду с преимуществами, металлокерамическим постоянным магнитам свойственны недостатки, влияющие на значения магнитных параметров и ограничивающие область их применения. Наиболее существенное влияние на свойства оказывают пористость и наличие неметаллических включений [3 – 5].

Одним из способов повышения значений магнитных параметров постоянных магнитов является разработка режимов спекания, позволяющих сформировать оптимальную магнитную структуру материала и исключить вредное влияние неметаллических соединений, а также снизить пористость изделия. Сохраняя шихтовый состав материала, аналогичный литым аналогам, и изменяя лишь режим термической обработки, можно изменить магнитные свойства материала.

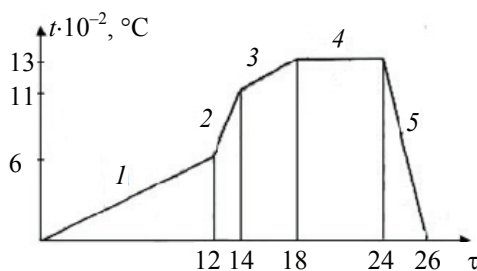
В результате спекания поликомпонентной шихты, карбонильных и электролитических порошков металлов и последующего охлаждения с контролируемой скоростью, структура металлокерамического постоянного магнита типа ЮНДК, представляет собой двухфазную структуру [6]. Она состоит из мелкодисперсных частиц ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы, изолированных, в магнитном смысле, парамагнитной матрицей –  $\alpha$ -фазой. Однако, при нарушении технологических режимов, в частности режимов спекания и последующего охлаждения, в структуре материала происходит формирование паразитной  $\gamma$ -фазы, обогащенной карбидами, которая оказывает существенное влияние на магнитные свойства, обусловленное формированием парамагнитных включений по границам зерен высококоэрцитивной фазы.

Для исключения влияния фазы, обогащенной углеродом, нами проведены исследования температурно-временных режимов спекания металлокерамических постоянных магнитов ЮНДК24, имеющих следующий шихтовый состав, %: 44 – железо по массе; 13 – никель; 24 – кобальт; 16 – железоалюминиевая лигатура; 3 – медь, позволяющие обеспечить оптимальную двухфазную магнитную структуру.

Спекание предварительно спрессованных изделий, изготовленных из поликомпонентной шихты карбонильных и электролитических порошков металлов, осуществлялось в вакуумной печи СШВ 2.2,5/25И1, обеспечивающей возможность изменения скорости нагрева и охлаждения в вакууме.

Для формирования оптимальной магнитной структуры, первоначально, изучены режимы спекания изделий из карбонильных порошков металлов, как наиболее подверженных образованию паразитной  $\gamma$ -фазы. На рисунке 1 представлена температурно-временная кривая спекания. Анализируя представленную температурно-временную зависимость, можно выделить пять характеристических участков различной длительности общей продолжительностью 26 ч.

В интервале температур 20...600 °С (рис. 1, участок 1) скоростью нагрева составляет 50 °С/ч, что объясняется необходимостью поддержания протекания процесса удаления продуктов распада органического пластификатора, вводимого в процессе формирования заготовки из карбонильных порошков металлов для



**Рис. 1. График температурно-временной кривой спекания прессовок из карбонильных порошков металлов**

улучшения прессуемости, а также очистки компонентов шихты от характерных для карбонильных порошков примесей (углерода, азота, кислорода). Данная скорость нагрева выбирается из необходимости поддержания постоянного значения вакуума в рабочем объеме при протекании процесса спекания. В диапазоне температур 200...400 °С происходит резкое падение значения остаточного вакуума, связанное с удале-

нием летучих примесей из компонентов шихты. При повторном нагреве в этом интервале температур, даже с повышенным значением скорости нагрева до 300 °С/ч снижение вакуума не наблюдается, что может свидетельствовать об удалении значительного количества газообразующих продуктов распада пластификатора.

При температуре 400 °С удаление органической связки завершается и начинаются процессы установления металлического контакта между частицами металлического порошка и твердофазного спекания. При нагреве до 500 °С наблюдается механизма поверхностной диффузии, характерного для спекания в присутствии жидкой фазы.

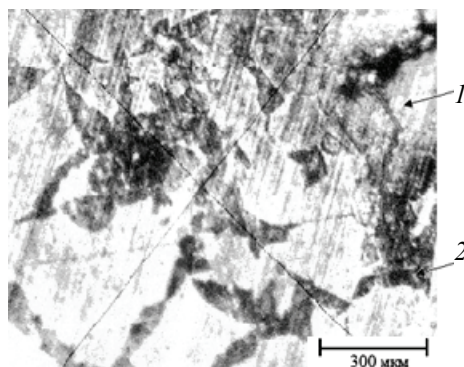
В интервале температур 600...1100 °С, где процесс жидкофазного спекания прессовок протекает наиболее интенсивно, нагрев осуществлялся со скоростью 250...300 °С/ч (см. рис. 1, участок 2) в течение двух часов. Со значения температуры 1100 °С (см. рис. 1, участок 3) скорость нагрева уменьшается до значения 50 °С/ч, в целях избежать возможного оплавления, обусловленного дисперсностью исходных порошков металлов, а также исключения концентрации термических напряжений, способствующих образованию дефектов структуры. При достижении температуры в 1300 °С (см. рис. 1, участок 4) осуществлена выдержка, общей длительностью 6 ч, достаточная для формирования однофазной структуры. Охлаждение после выдержки (см. рис. 1, участок 5) проводится с печью, обеспечивающей охлаждение с оптимальной скоростью для данного типа материалов.

Подготовка для анализа структуры спеченных по рассмотренному режиму (см. рис. 1) образцов порошковых постоянных магнитов проводилась по стандартной металлографической методике с многократной полировкой и травлением 5%-ым раствором азотной кислоты. Результаты исследований с помощью оптического микроскопа, представлены на рис. 2.

Магнитный материал представляет собой неоднородный твердый раствор, состоящий из двух разнородных фаз. Структура включает в свой состав темные участки повышенной травимости  $\gamma$ -фазы с мелкими включениями и светлые зерна с малой травимостью  $\alpha$ -фазы, окруженные крупными темными полями. Площадь фазы, не подверженной воздействию травителя меньше, однако расположение ее таково, что она является своеобразной матрицей и определяет результирующие механические свойства, что подтверждается высокой пластичностью. Присутствие в структуре двух составляющих с таким аномальным расположением фаз может быть вызвано несколькими причинами.

Во первых, при медленном охлаждении после спекания может наблюдаться частичное развитие карбидосодержащей  $\gamma$ -фазы в районе минимальной устойчивости  $\lambda$ -фазы (1050 °С), однако, выделение  $\gamma$ -фазы происходит в объеме зерна однофазной структуры  $\lambda$ , очертания границ которой сохраняются [7, 8]. Кроме того, принятая температура охлаждения 50...80 °С/ч, могла быть недостаточной для сохранения однофазной структуры.

Принятая скорость нагрева 50 °С/ч в интервале температур 200...400 °С не обеспечивает полного



**Рис. 2. Микроструктура порошкового магнитного материала, изготовленного из карбонильных порошков металлов:**  
1 –  $\alpha$ -фаза; 2 –  $\gamma$ -фаза

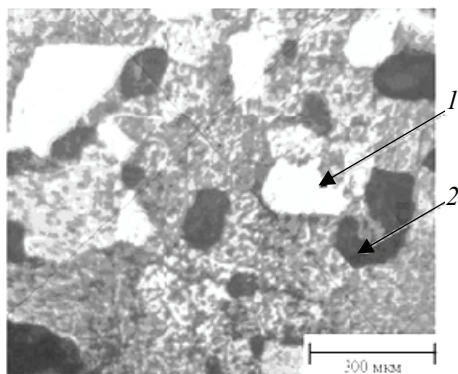
удаления примесей и, в первую очередь, углерода, присутствующего в карбонильных металлических порошках, в том числе в виде графита, который расширяет интервал существования двухфазной области и понижает устойчивость  $\lambda$ -фазы.

Для установления истинных причин, влияющих на формирование аномальной структуры магнитного материала, опробованы несколько вариантов спекания с измененными температурно-временными режимами. Первоначально исследовано влияние уменьшения временного интервала нагрева в низкотемпературной области (200...400 °С).

До 200 °С нагрев проводился со скоростью 400 °С/ч, после чего скорость снижалась до 50 °С/ч на интервале температур 200...400 °С. На данном участке температурно-временной кривой, происходит падение вакуума, что свидетельствует о процессе выделения продуктов распада органических пластификаторов и начале процесса припекания металлических частиц порошка. При достижения температуры 400 °С скорость нагрева увеличивается до 250 °С/ч вплоть до температуры 1200 °С в целях обеспечения процесса жидкофазного спекания. Далее происходит медленный нагрев (50 °С/ч) до 1300 °С с последующей выдержкой при данной температуре в течение 6 ч. Охлаждение после спекания проводится аналогично рассмотренному ранее процессу.

Микроструктура порошкового магнита после спекания по данному режиму характеризуется еще большей неоднородностью (рис. 3) и свидетельствует о малом времени нагрева в низкотемпературной области. Структура материала представляет собой неоднородный твердый раствор, состоящий из смеси  $\lambda$ - и  $\gamma$ -фаз. Но в отличие от представленной ранее морфологии, при снижении времени выдержки в низкотемпературной области наблюдается процесс коагуляции и укрупнения частиц карбидосодержащей  $\gamma$ -фазы в процессе медленного охлаждения с печью. Данное изменение структуры позволяет сделать вывод о том, что снижение времени нагрева в низкотемпературной области спекания не обеспечивает формирование продуктов распада углерода, содержащегося в карбонильных порошках металлов.

Для достижения оптимальной магнитной структуры прессовок из карбонильных порошков металлов была увеличена скорость нагрева в интервале температур существования двухфазной структуры (900...1200 °С), а также временной



**Рис. 3. Микроструктура порошкового магнитного материала, изготовленного из карбонильных порошков металлов, спеченного по режиму с уменьшенным временем спекания в низкотемпературной области:**  
1 –  $\alpha$ -фаза; 2 –  $\gamma$ -фаза

участка спекания в низкотемпературном диапазоне температур. В интервале температур 200...700 °С скорость нагрева составляла 50 °С/ч время нагрева – 10 ч. При достижении интервала 700...1200 °С скорость нагрева была увеличена до 500 °С/ч. Микроструктура образцов после спекания аналогична представленным ранее: темные поля интенсивно травящейся  $\gamma$ -фазы, по-прежнему, имеют большую площадь, однако происходит увеличение площади слаботравящейся  $\lambda$ -фазы.

Проанализировав результаты изменения структуры в процессе спекания, можно сделать следующие выводы. Основная причина неоднородности и аномального строения струк-

туры порошковых постоянных магнитов, изготовленных из карбонильных порошков металлов, состоит в недостаточном времени выдержки в диапазоне температур 200...400 °С и связанном с этим повышенным содержанием углерода, увеличивающим критическую скорость охлаждения при протекании процесса первого превращения, снижает температуру плавления, расширяет температурный интервал существования двухфазной ( $\lambda + \gamma$ )-структуры.

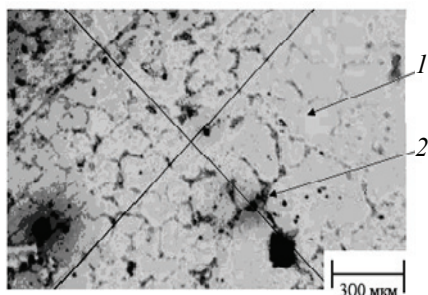
Попытка повышения температуры спекания до 1320...1350 °С приводит к оплавлению прессованных изделий даже при очень медленной скорости нагрева, что также косвенно подтверждает повышенное содержание углерода. Увеличение времени нагрева в низкотемпературной области способствует формированию оптимальной структуры, однако отличается высоким уровнем энергозатрат. Таким образом, учитывая влияние содержащегося в карбонильных порошках углерода, использование данной группы порошковых материалов для создания высококоэрцитивных магнитов с высоким значением магнитных параметров малоэффективно.

Изучены температурно-временные режимы спекания прессовок металлокерамических магнитов, изготовленных из электролитических порошков металлов. Учитывая, что в их составе содержится малое количество углерода, и для их прессования не требуется органическая связка, использование больших временных интервалов в низкотемпературной области не является необходимым.

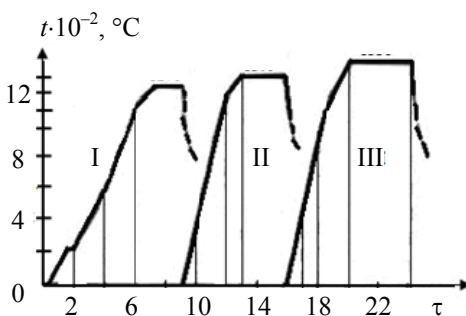
При спекании электролитических порошковых композитов по приведенным ранее режимам микроструктура магнитного материала остается практически неизменной и представляет собой светлую матрицу двухфазной структуры, состоящей из ( $\lambda + \lambda'$ )-фаз, темные включения, являющиеся следствием выделения  $\gamma$ -фазы в процессе охлаждения с печью и последующего полиморфного превращения  $\gamma \rightarrow \lambda_\gamma$  при температуре 800 °С (рис. 4). Основной структуры является слабо травящаяся структурная составляющая с выделяющимися в ней границами зерен. На границах зерен имеются отдельные включения сильно травимой составляющей, соединенной в единую сетку.

В целях разработки оптимального температурно-временного процесса спекания проведен анализ ступенчатого режима спекания изделий из электролитических порошков металлов с возможно минимальным временем нагрева, температурой спекания и временем выдержки (рис. 5).

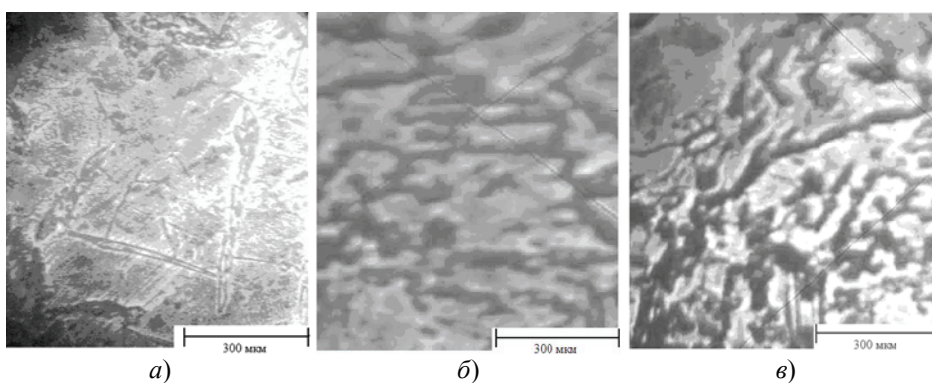
В процессе исследования режимов спекания электролитических порошков металлов соблюдены все этапы, используемые для карбонильных порошков, однако с учетом исключения операции выжигания органической связки уменьшена



**Рис. 4. Микроструктура образцов из электролитических порошков металлов после спекания:**  
1 – ( $\lambda + \lambda'$ )-фаза; 2 –  $\gamma$ -фаза



**Рис. 5. Температурно-временная схема спекания изделий из электролитических порошков при нагреве:**  
I – до 1270 °С; II – до 1300 °С; III – до 1330 °С



**Рис. 6. Микроструктура образцов после спекания длительностью в течение 2 ч при температуре 1240 °С (а), 1270 °С (б) и 4 ч при температуре 1330 °С (в)**

выдержка в низкотемпературном интервале (40 мин, при 200 °С), максимальная температура нагрева составила 1240 °С. После охлаждения с печью и извлечения части образцов произведен повторный нагрев со скоростью 500 °С/ч, с повышением температуры выдержки до 1270 °С. Третий нагрев до температуры 1330 °С проходил с четырехчасовой выдержкой. Общая продолжительность выдержки при температуре спекания составила 8 ч.

В процессе спекания наблюдается протекание интенсивного процесса образования ряда фаз с различной морфологией ( $\lambda$ - и  $\lambda_\gamma$ -фаз). Последующее увеличение времени выдержки при температуре спекания приводит к росту усадки и плотности изделия, что обуславливается процессами спекания в присутствии жидкой фазы. Происходит процесс гомогенизации структуры материала и образования однофазной структуры  $\lambda$ -фазы, что является необходимым условием для формирования высокого значения магнитных параметров постоянных магнитов марки ЮНДК. Изменение микроструктуры при различных температурно-временных режимах спекания представлено на рис. 6.

Исходя из приведенных данных и результатов анализа структуры материала, можно сделать вывод, что для обеспечения оптимальной морфологии магнитного материала, способствующей формированию двухфазной высококоэрцитивной структуры, необходимо осуществить следующий режим спекания поликомпонентной шихты, состоящей из электролитических порошков металлов: нагрев до температуры спекания 1330 °С в течение 4 ч с выдержкой 6 ч при данной температуре и последующим охлаждением с печью.

Полученные в результате исследования данные по режимам спекания электролитических и карбонильных порошков металлов и их влияния на структуру магнитного материала позволяют сделать рекомендации по условиям термической обработки магнитных материалов в целях последующего обеспечения высокого значения магнитных параметров.

*Работа выполнена в рамках программы конкурса «Гранты для поддержки прикладных исследований молодых ученых 2016 года» управления образования и науки Тамбовской области, соглашение № 19-04/МУ6-16.*

#### *Список литературы*

1. Гавриш, А. П. Шлифование и доводка магнитных материалов / А. П. Гавриш. – Л. : Машиностроение, 1985. – 117 с.

2. John, M. JOM-e: Magnetic Materials in Electronic Applications / M. John, Jr. Parsey // The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2000. – Vol. 52, No. 6. – P. 16. doi: 10.1007/s11837-000-0139-4
3. Проценко, И. Г. Использование сканирующей зондовой микроскопии для изучения структуры и свойств постоянных магнитов / И. Г. Проценко, А. П. Королев, И. С. Филатов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 701 – 707. doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.701-707
4. Влияние свойств исходных порошков на структурные характеристики пористых материалов / В. К. Шелег [и др.] // Порошк. металлургия. – 1992. – № 2. – С. 47 – 52.
5. Брусенцов, Ю. А. Исследование структуры и свойств порошковых сплавов / Ю. А. Брусенцов, А. М. Минаев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 1Б. – С. 228 – 233.
6. Куневич, А. В. Ферриты. Энциклопедический справочник. Т. 1 : Магниты и магнитные системы / А. В. Куневич, А. В. Подольский, И. Н. Сидоров. – СПб. : Лик, 2004. – 358 с.
7. Довгалецкий, Я. М. Легирование и термическая обработка магнитотвердых сплавов / Я. М. Довголевский. – М. : Металлургия, 1971. – 176 с.
8. Никифорова, Э. М. Теоретические основы, технология получения и свойства порошковых материалов : курс лекций / Э. М. Никифорова, О. А. Артемьева, А. Г. Верхотуров. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 300 с.
- 

## Study of Temperature-Time Modes of Sintering and Their Impact on the Structure of Metal-Ceramic Permanent Magnets

I. G. Protsenko<sup>1</sup>, D. M. Mordasov<sup>1</sup>, D. E. Kobzev<sup>2</sup>

*Departments: “Materials and Technology” (1); “Operation of Motor Transport and Car Service” (2), TSTU, Tambov, Russia;  
iliaprocenko@rambler.ru*

**Keywords:** carbonyl and electrolytic powders of metals; highly coercive structure; magnetic parameters; multicomponent blend; time-temperature sintering mode.

**Abstract:** The paper discusses the time-temperature modes of sintering YuNDK powdered permanent magnets made from multicomponent blend of metal powders obtained by the reduction from carbides and through electrolysis. It was found that sintering of pre-pressed powdered permanent magnets from metal carbonyl powders causes the formation of the structure containing rich phase carbon in its composition, which adversely affects the magnetic properties of the material. A series of experiments to study the sintering modes for optimal magnetic morphology was conducted. It was found that the change in the temperature-time sintering conditions causes the removal of carbon from the carbonyl metal powders and leads to complication of the process. The sintering modes for items pressed from powder material obtained by electrolysis was studied. It was found that the thermal influence might cause the formation of the optimal magnetic structure, providing high values of magnetic parameters.

## References

1. Gavrish A.P. *Shlifovanie i dovodka magnitnykh materialov* [Sanding and finishing of magnetic materials], Leningrad: Mashinostroenie, 1985, 117 p. (In Russ.)
2. John M., Parsey Jr. JOM-e: Magnetic Materials in Electronic Applications, *The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2000, vol. 52, no. 6, pp. 16, doi: 10.1007/s11837-000-0139-4
3. Protsenko I.G., Korolev A.P., Filatov I.S. Using Scanning Probe Microscopy to Study the Structure and Properties of Permanent Magnets, *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 701-707, doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.701-707 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Sheleg V.K., Kaptsevich V.M., Savich V.V., Sorokina A.N. [Influence of original powder properties on the structural characteristics of porous materials], *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1992, vol. 31, no. 2, pp. 138-142, doi: 10.1007/BF00794049 (In Russ.)
5. Brusentsov Yu.A., Minaev A.M. Examination of Structure and Properties of Powdered Alloy, *Transactions of Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, no. 1B, pp. 228-233. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kunevich A.V., Podol'skii A.V., Sidorov I.N. *Ferrity. Entsiklopedicheskii spravochnik. T. 1 : Magnity i magnitnye sistemy* [Ferrite. Encyclopedic Reference. T. 1 : Magnetsand magnetic systems], St. Petersburg: Lik, 2004, 358 p. (In Russ.)
7. Dovgalevskii Ya.M. *Legirovanie i termicheskaya obrabotka magnitotverdykh splavov* [The alloying and heat treatment of magnetic alloys], Moscow: Metallurgiya, 1971, 176 p. (In Russ.)
8. Nikiforova E.M., Artem'eva O.A., Verkhoturov A.G. *Teoreticheskie osnovy, tekhnologiya polucheniya i svoystva poroshkovykh materialov : kurs lektsii* [Theoretical bases, technology and properties of powder materials: lectures], Krasnoyarsk: IPK SFU, 2009, 300 p. (In Russ.)

---

## Erlernen der temperatur-zeitlichen Regimes der Versinterung und ihrer Einwirkung auf die Struktur der metallkeramischen ständigen Magnete

**Zusammenfassung:** Es sind die temperatur-zeitlichen Regimes der Versinterung der ständigen Pulvermagnete YuNDK, die aus dem Polykomponentenbeschickungsgut der durch die Reduktion aus den Carbiden und mit Hilfe der Elektrolyse erhaltenen Metallpulver hergestellt sind, betrachtet. Es ist bestimmt, dass es im Laufe der Versinterung der ständigen vorher gepressten Pulvermagnete aus den Karbonylpulvermetallen die Struktur gebildet wird, die in ihrer Zusammensetzung die vom Kohlenstoff bereicherte Phase enthält und auf die magnetischen Parameter des Materials negativ beeinflusst. Es ist die Reihe der Experimente nach dem Erlernen der Regimes der Versinterung zwecks der Versorgung der optimalen magnetischen Morphologie durchgeführt. Es ist bestimmt, dass die Veränderung der temperatur-zeitlichen Regimes der Versinterung, die die Entfernung des Kohlenstoffes aus der Zusammensetzung der Karbonylpulver der Metalle gewährleisten, zum Kompliziertwerden des technologischen Prozesses bringt. Es sind die Regimes der Versinterung der Erzeugnisse, die aus den durch die elektrolytischen Weise erhaltenen Pulvermaterialien zusammengemischt sind, erlernt. Es ist bestimmt, dass im Laufe der thermischen Einwirkung die optimale magnetische Struktur, die die hohen Bedeutungen der magnetischen Parameter gewährleistet, gebildet sein kann.



## **Etude des régimes de chaleur et de temps de l'agrégation et de leur influence sur la structure des aimants permanents à métal fritte**

**Résumé:** Sont considérés les régimes de chaleur et de temps de l'agrégation des aimants permanents de poudre YuNDK, fabriqués à partir du mélange de la charge polycomposée des poudres métalliques obtenus par la réduction des carbures et avec l'aide de l'électrolyse. Est constaté que dans le processus de l'agrégation des aimants de poudres pressées préalablement des aimants permanents de poudres de carbonyle des métaux se forme la structure contenant dans sa composition une phase riche en carbone influençant négativement sur les paramètres du matériau. Est effectuée une série d'expériences sur l'étude des régimes de chaleur et de temps de l'agrégation. Est constaté que lors de l'action thermique peut être formée une structure magnétique optimale assurant les plus hautes valeurs des paramètres magnétiques.

---

**Авторы:** *Проценко Илья Григорьевич* – аспирант кафедры «Материалы и технология»; *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология»; *Кобзев Дмитрий Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---