

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования

«Витебский государственный технологический университет»

УДК 534.321.9: 621.762.4

Номер гос.рег. 20113536

Инв. № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе УО «ВГТУ»,

Е.В. Ванкевич

2013 г.



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Разработка ультразвуковых методов механоактивации порошков для
электрокерамических материалов, изучение их структуры и свойств
(заключительный)**

2014 – г/б – 389

Начальник НИЧ

С.А. Беликов

26.12.2013

Руководитель задания, д.т.н.

В.В. Рубаник

26.12.2013

Витебск 2013




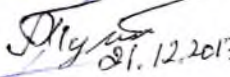





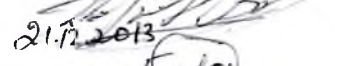
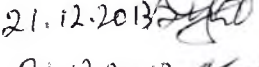
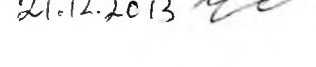
Список исполнителей

Руководитель темы,


д.т.н.  21.12.2013 В.В. Рубаник

(общее руководство НИР, введение
заключение, раздел 1-12)

Исполнители:

1. к.ф.-м.н., доцент  21.12.2013 А.Д. Шилин (раздел 1-12)
2. к.ф.-м.н., доцент  21.12.2013 В.В. Рубаник (мл.) (раздел 1-12)
4. к.ф.-м.н., доцент  21.12.2013 А.А. Мокеев (раздел 10-12)
5. к.ф.-м.н., с.н.с.  21.12.2013 А.В. Пушкарев (раздел 9-12)
6. к.ф.-м.н., доцент  21.12.2013 Н.С. Буйнов (раздел 11-12)
7. к.б.н., доцент  21.12.2013 М.В. Шилина (раздел 1-12)
8. ст. преподаватель  21.12.2013 О.Е. Рубаник (раздел 9)
9. аспирант  21.12.2013 В.Ю.Новиков (раздел 1-12)
10. студент  21.12.2013 И.К. Иканович (раздел 1-12)
11. студент  21.12.2013 В.Н. Павленко (1-12)
12. студент  21.12.2013 П.А. Быстриков (раздел 1-12)
13. инженер  21.12.2013 П.А. Чернов (раздел 10-12)

Нормоконтролер

 А.Б. Чернова
21.12.2013

Реферат

Отчет 171 с., 92 рис., 119 источников, 2 табл., 2 приложения.

УЛЬТРАЗВУК, ПОРОШОК, СЕГНЕТО – И ПЬЕЗОКЕРАМИКА, НАНОПОРОШКИ, СУХОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ, УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, НАНОКЕРАМИКА, ДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, МЕХАНОАКТИВАЦИЯ, ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ, НАНОСТРУКТУИРОВАННЫЙ МАТЕРИАЛ.

Цель работы – разработка и создание оборудования и оснастки ультразвукового измельчения и механоактивации неметаллических порошковых материалов при атмосферном и избыточном давлении для изготовления конструкционной и электрически активной керамики. Исследование механоактивированных с использованием ультразвука порошков для защитных покрытий, электрокерамических материалов, изучение их структуры и свойств, а также особенностей получаемых из них керамических материалов.

Проведен анализ способов повышения активности неметаллических порошков используемых для синтеза электрокерамических материалов. Сконструировано и изготовлено оборудование и оснастка для проведения ультразвукового измельчения и механоактивации порошковых материалов в жидкой среде при атмосферном и избыточном давлении до $8 \cdot 10^5$ Н и амплитуде ультразвуковых колебаний (УЗК) 30 и 50 мкм.

Получены слоистые двойные гидроксиды $Zn(2)Al-V_2O_7$ (LDH-соединение) для антикоррозионных покрытий и исследованы их физические свойства после ультразвуковой обработки. Установлено, что применение ультразвуковых колебаний обеспечивает дробление агломератов в порошке $Zn(2)Al-V_2O_7$ без разрушения фазового состава, что обеспечивает равномерное распределение частиц LDH при добавлении их в полимерный слой антикоррозионных покрытий. Разработанные LDH -наноконтейнеры перспективные кандидаты на замещение хромата на основе антикоррозионных пигментов, так как они обеспечивают

сопоставимую или даже превосходят защиту от коррозии, чем традиционные хроматы.

Исследовано влияние ультразвуковой механоактивации на свойства керамик ЦТС-19, ЦТБС-3М и $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. Показана перспективность применения механоактивации для получения электрически активной и конструкционной керамики с улучшенными физико-механическими свойствами. Проведены теоретические исследования фазовых переходов в керамике ЦТС-19 и ЦТБС-3М, полученной с использованием УЗК, которые позволяют объяснить дисперсию диэлектрической проницаемости на высоких частотах и указать пути получения материала с заданными физико-механическими свойствами.

Содержание	стр.
Введение.	7
Методика проведения эксперимента.	10
1 Анализ способов повышения активности неметаллических порошков используемых для синтеза электрокерамических материалов.	13
2 Проектирование оборудования и оснастки для проведения ультразвуковой механоактивации.	25
3 Оборудование и оснастка для проведения ультразвуковой механоактивации.	35
4 Отработка методики проведения ультразвуковой механоактивации.	40
5 Изучение свойств синтезированных исходных порошковых материалов	44
6 Ультразвуковая механоактивация порошковых материалов	53
7 Исследование дисперсности и микроструктуры порошковых материалов, подвергнутых ультразвуковому воздействию	57
8 Исследование физических свойств материалов, полученных с использованием высокоэнергетических воздействий	61
9 Конструирование вибромельницы для активации порошковых материалов с использованием ультразвуковых колебаний	63
10 Вибромельница для активации порошковых материалов с использованием ультразвуковых колебаний	68
11 Получение керамики с использованием механического помола порошковых материалов в поле акустических волн	74
12 Исследование керамики, полученной с использованием механического помола порошковых материалов в поле акустических волн	84
Заключение.	140
Список использованных источников.	143
Приложение 1. Компактирование порошковых материалов с использованием УЗК, методы расчета параметров ультразвуковых систем для получения пресс-заготовок.	155

Витебский государственный технологический университет

Список использованных источников

- 1 Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл. и др. Перспективные материалы / Витебск: Изд. Центр УО ВГТУ, 2009. – 542 С.
2. Хасанов, О.Л. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов. / О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис, Полисадова В.В. Томск: ТПУ, 2008. – 153 с.
3. Арсеньев, И.П. Ультрадисперсные металлические порошки: получение, структура, свойства / И.П. Арсеньев, М.М. Ристич. – Белград: ИТН САНИИ, 1987. – 142 с.
4. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл., Петров И.В., Маркова Л.В., Коледа В.В. Измельчение частиц пресс-порошка с использованием энергии взрыва и ультразвуковых колебаний // Тез. Докл. Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». 25-29 мая 2009, Витебск, Беларусь. С. 25.
5. S.P. Newman, W. Jones. Synthesis, characterization and applications of layered double hydroxides containing organic guests. *New J. Chem.* 22 (1998) 105-115.
6. F. Leroux, J.P. Besse. Preparation and characterization of new Ca–Al–olycarboxylate layered double hydroxides. *Chem. Mater.* 13 (2001) 3507-3515.
7. A.I. Khan, D. O'Hare. Intercalation Chemistry of Layered Double Hydroxides: Recent Developments and Applications *J. Mater. Chem.* 12 (2002) 3191-3198.
8. V.R.L. Constantino, T.J. Pinnavaia. Methods and Applications for Delamination of Layered Double Hydroxides. *Inorg. Chem.* 34 (1995) 883.
9. F. Kooli, I.C. Chisen, M. Vucelic, W. Jones. Aluminum-containing layered double hydroxides: the thermal, mechanical, and fire properties of (nano)composites of poly(methyl methacrylate). *Chem. Mater.* 8 (1996) 1969-1976.
10. J. Rodriguez-Carvajal. Recent Advances in Magnetic Structure Determination by Neutron Powder Diffraction. *J. Physica B: Condens. Matter* 192 (1993) 55-61.

11. Арсеньев, И.П. Ультрадисперсные металлические порошки: получение, структура, свойства / И.П. Арсеньев, М.М. Ристич. – Белград: ИТН САНИИ, 1987. – 142 с.
12. Ходаков Г.С. Физика измельчения. Наука", 1972. — 307 с.
13. Харитонов Д. О. Физика и техника ультразвукового формообразования пьезокерамики. Автореферат диссертация. Санкт-Петербург 2006. 18с.
14. Артемьев В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. Ультразвук и обработка материалов. – Мн.: «Экоперспектива» 2003 . 355 с.
15. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл., Петров И.В., Маркова Л.В., Коледа В.В. Измельчение частиц пресс-порошка с использованием энергии взрыва и ультразвуковых колебаний // Тез. Докл. Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». 25-29 мая 2009, Витебск, Беларусь. С. 25.
16. Прилипко Ю. С. Функциональная керамика. Оптимизация технологии: - Донецк: Норд-Пресс, 2007. - 492 с.
17. Прилипко Ю. С., Салей В. С., Пилипенко Н. П. Изучение влияния некоторых физических воздействий на технологические параметры получения пьезоматериалов и электрофизические свойства пьезокерамики // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія, 2002. - Вип. 44. - С. 110-119.
18. Хасанов О.Л. Научные основы сухого компактирования ультрадисперсных порошков в технологии изготовления нанокерамики. - Дисс. докт. техн. наук. – Томск, ТПУ, 2003. – 371 с.
19. Хасанов О.Л., Похолков Ю.П. Соколов В.М., Двилис Э.С., Бикбаева З.Г., Полисадова В.В., Струц В.К. Ультразвуковая обработка наноструктурных порошков для изготовления циркониевой технической керамики. «Перспективные материалы», № 1, 2000 г., С. 50-55
20. Хасанов О.Л., Иванов Ю.Ф., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Козлов Э.В., Дедов Н.В., Похолков Ю.П. Бикбаева З.Г., Полисадова В.В., Структура и фазовый

состав циркониевой нанокерамики, изготовленной с применением ультразвукового прессования. «Перспективные материалы», № 5 1999 г., С. 52-60 .

21. Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы, Машгиз. 1959.

22. Агранат, Б.А. Ультразвук в порошковой металлургии. / Б. А. Агранат [и др.]. – М: 1986. - 168 с.

23. Артемьев В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. Ультразвук и обработка материалов. – Мн.: «Экоперспектива» 2003 . 355 с.

24. Пугачев С.И., Семенова Н.Г. «Ультразвук в технологии машиностроения». – Архангельск: 1991. С. 128-131.

25. Агранат Б.А., Гудович А.П., Нежевенко П.Б. Ультразвук в порошковой металлургии. – М: 1986. 168 с.

26. Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швегла Ш. Ультразвуковая обработка материалов М. «Машиностроение», 1984, 280 с.

27. В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев. Автоматизированное проектирование ультразвуковых колебательных систем. http://www.xn--80aeonb4angg8f.su/downloads/tula_uos.pdf

28. G.W. Walter. Performance of epoxy electrodeposited coating on carbon steel surface. Corr. Sci. 26 (1986) 27–38.

29. H. Wang, R. Akid. A room temperature cured sol-gel anticorrosion pre-treatment for Al 2024-T3 alloys. Corr. Sci. 49 (2007) 4491–4503.

30. D. Raps, T. Hack, J. Wehr, M.L. Zheludkevich, A.C. Bastos, M.G.S. Ferreira.

Nuyken. Electrochemical study of inhibitor-containing organic-inorganic hybrid coatings on AA2024. Corr. Sci. 51 (2009) 1012–1021.

31. G. Blustein, A.R. Di Sarli, J.A. Jain, R. Romagnoli, B. Del Amo. Study of iron benzoate as a novel steel corrosion inhibitor pigment for protective paint films. Corr. Sci. 49 (2007) 4202–4231.

32. J. Sinko. Challenges of chromate inhibitor pigments replacement in organic coatingsProg. Org. Coat. 42 (2001) 267–282.

33. N.C. Rosero-Navarro, S.A. Pellice, A. Durón, M. Aparicio. Recubrimientos vítreos realizados por sol-gel para la protección de metales frente a la corrosión. *Corr. Sci.* 50 (2008) 1283–1291.
34. S.V. Lamaka, M.L. Zheludkevich, K.A. Yasakau, R. Serra, S.K. Poznyak, M.G.S. Ferreira. Nanoporous titania interlayer as reservoir of corrosion inhibitors for coatings with self-healing ability. *Prog. Org. Coat.* 58 (2007) 127–135.
35. S.V. Lamaka, M.L. Zheludkevich, K.A. Yasakau, M.F. Montemor, P. Ceschio, M.G.S. Ferreira. TiO_x self-assembled networks prepared by templating approach as nanostructured reservoirs for self-healing anticorrosion pre-treatments. *Electrochem. Commun.* 8 (2006) 421–428.
36. M.L. Zheludkevich, R. Serra, M.F. Montemor, K.A. Yasakau, I.M. Miranda Salvado, M.G.S. Ferreira. Nanostructured Sol-Gel Coatings Doped with Cerium Nitrate as Pre-Treatments for AA2024-T3. Corrosion Protection Performance. *Electrochim. Acta* 51 (2005) 208–217.
37. H. Yang, W.J. van Ooij. Plasma-treated triazole as a novel organic slow-release paint pigment for corrosion control of AA2024-T3. *Prog. Org. Coat.* 50 (2004) 149–161.
38. G. Decher, J.D. Hong, J. Schmitt. Buildup of ultrathin multilayer films by a self-assembly process: III. Consecutively alternating adsorption of anionic and cationic polyelectrolytes on charged surfaces. *Thin Solid Films* 210/211 (1992) 831–835.
39. M. Zheludkevich, D.G. Shchukin, K.A. Yasakau, H. Mohwald, M.G.S. Ferreira. Anticorrosion coatings with self-healing effect based on nanocontainers loaded with corrosion inhibitor. *Chem. Mater.* 19 (2007) 402–411.
40. D.G. Shchukin, M. Zheludkevich, K. Yasakau, S. Lamaka, M.G.S. Ferreira, H. Mohwald. LbL Nanocontainers for Self-Healing Corrosion Protection. *Adv. Mater.* 18 (2006) 1672–1678.
41. D.G. Shchukin, S.V. Lamaka, K.A. Yasakau, M.L. Zheludkevich, H. Mohwald, M.G.S. Ferreira. Active Anticorrosion Coatings with Halloysite nanocontainers. *Journal of Physical Chemistry C*, 112 (2007) 958–964
42. D.G. Shchukin, M. Zheludkevich, H. Mohwald. Feedback active coatings based on incorporated nanocontainers. *J. Mater. Chem.* 16 (2006) 4561–4566.

43. R.G. Buchheit, S.B. Mamidipally, P. Schmutz, H. Guan. Active Corrosion Protection in Ce-Modified Hydrotalcite Conversion Coatings. *Corrosion* 58 (2002) 3-14.
44. H.N. McMurray, D. Williams, G. Williams, D. Worsley. Inhibitor pretreatment synergies demonstrated using a scanning Kelvin probe technique. *Corros. Eng. Sci. Technol.* 38 (2003) 112–118.
45. S. Bohm, H.N. McMurray, S.M. Powell, D.A. Worsley. Computational modeling of inhibitor release and transport from coatings. *Mater. Corros.* 52 (2001) 896–903.
46. R.B. Leggat, W. Zhang, R.G. Buchheit, S.R. Taylor. Performance of Hydrotalcite Conversion Treatments when used in a Coating System on AA2024-T3. *Corrosion* 58 (2002) 322–328.
47. H. Wang, F. Presuel, R.G. Kelly. Computational modeling of inhibitor release and transport from multifunctional organic coatings. *Electrochim. Acta* 49 (2004) 239–255.
48. R.G. Buchheit, H. Guan, S. Mahajanam, F. Wong. Active Corrosion Protection and Corrosion Sensing in Chromate-free Organic Coatings. *Prog. Org. Coat.* 47 (2003) 174–182.
49. S.P.V. Mahajanam, R.G. Buchheit. Characterization of Inhibitor Release from ZnAl-[V10O28]6- Hydrotalcite Pigments and Corrosion Protection from Hydrotalcite Pigmented Epoxy Coatings. *Corrosion* 64 (2008) 230–240.
50. H.N. McMurray, G. Williams. Application of hydrotalcites as corrosion-inhibiting pigments in organic coatings. *Corrosion* 60 (2004) 219–228.
51. J.K. Lin, J.Y. Uan. Formation of Mg,Al-hydrotalcite conversion coating on Mg alloy in aqueous HCO₃⁻/CO₃²⁻ and corresponding protection against corrosion by the coating. *Corr. Sci.* 51 (2009) 2371–2391.
52. G. Williams, H.N. McMurray. Cerium(III) inhibition of corrosion-driven organic coating delamination studied using a scanning Kelvin probe technique. *Electrochem. Solid-State Lett.* 7 (2004) B13–B15.
53. R.L. Cook Jr., S.R. Taylor. Pigment-Derived Inhibitors for Aluminum Alloy 2024-T3. *Corrosion* 56 (2000) 321-333.
54. D.G. Shchukin, M.L. Zheludkevich, H. M \ddot{u} rwald. Feedback active coatings based on incorporated nanocontainers. *J. Mater. Chem.* 16 (2006) 4561- 4566.

55. R.G. Buchheit, H. Guan, S. Mahajanam, F. Wong. Active corrosion protection and corrosion sensing in chromate-free organic coatings. *Prog. Org. Coat.* 47 (2003) 174-182.
56. R.G. Buchheit, H. Guan, S. Mahajanam, F. Wong. Active corrosion protection and corrosion sensing in chromate-free organic coatings. *Prog. Organic Coatings* 47(2003) 174-182.
57. G. Williams, H.N. McMurray. Fifth International Symposium on Advances in Corrosion Protection by Organic Coatings. *Electrochem. Solid-State Lett.* 6 (2003) B9.
58. M.L. Zheludkevich et al. Active protection coatings with layered double hydroxide nanocontainers of corrosion inhibitor. *Corrosion Science*, 52 (2010) 602-611.
59. C. Barriga, W. Jones, P. Malet, V. Rives, M.A. Ulibarri. Synthesis and characterization of polyoxovanadate-pillared Zn-Al layered double hydroxides : An x-ray absorption and diffraction study. *Inorg. Chem.* 37 (1998)1812-1820.
60. S.P.V. Mahajanam, R.G. Buchheit. Chromate-free corrosion inhibition of aluminum alloys: vanadates and anionic exchange clay pigments. *Corrosion* 64 (2008) 230.
61. S.P. Newman, W. Jones, Synthesis, characterization and applications of layered double hydroxides containing organic guests. *New J. Chem.* 22 (1998) 105-115.
62. A.I. Khan, D. O'Hare. Intercalation Chemistry of Layered Double Hydroxides: Recent Developments and Applications. *J. Mater. Chem.* 12 (2002) 3191.
63. S.K. Poznyak, J. Tedim, L.M. Rodrigues, A.N. Salak, M.L. Zheludkevich, L.F.P. Dick, M.G.S. Ferreira. Novel inorganic host layered double hydroxides intercalated with guest organic inhibitors for anticorrosion applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 1 (2009) 2353-2363.
64. K.D. Ralston, S. Chrisanti, T.L. Young, R.G. Buchheit. Corrosion Inhibition of Aluminum Alloy 2024-T3 by Aqueous Vanadium Species. *J. Electrochem. Soc.* 155. (2008) C350-C359.
65. S.P.V. Mahajanam, R.G. Buchheit. Characterization of Inhibitor Release from ZnAl-[V10O28]6- Hydrotalcite Pigments and Corrosion Protection from Hydrotalcite Pigmented Epoxy Coatings. *Corrosion* 64 (2008) 230.

66. M.L. Zheludkevich, S.K. Poznyak, L.M. Rodrigues, D. Raps, T. Hack, L.F. Dick, T.Nunes, M.G.S. Ferreira. Active protection coatings with layered double hydroxide nanocontainers of corrosion inhibitor, *Corrosion Science*. *Corr. Sci.* 52 (2010) 602.
67. A.N. Salak, J. Tedim, A.I. Kuznetsova, M.L. Zheludkevich, M.G.S. Ferreira. Anion exchange in Zn–Al layered double hydroxides: In situ X-ray diffraction study. *Chemical Physics Letters*, 495 (2010) 73-76
68. J. Tedim, A. Kuznetsova, A.N. Salak, F. Montemor, D. Snihirova, M. Pilz, M.L. Zheludkevich, M.G.S. Ferreira. Zn-Al Layered double hydroxides as chloride nanotraps in active protective coatings. *Corr. Sci.* 55 (2012) 1.
69. A. Ennadi, A. Legrouri, A. De Roy, J.P. Besse. X-ray diffraction pattern simulation for thermally treated Zn-Al-Cl layered double hydroxide. *J. Solid State Chem.* 152 (2000) 568-572.
70. D.R. Hines, S.A. Solin, U. Costantino, M. Nocchetti, "Physical Properties of Fixed Charge Layer Double Hydroxides", *Phys. Rev. B* 61 (2000) 11348-11358.
71. M.C. Richardson, P.S. Braterman. Fabrication of MMO–TiO₂ one-dimensional photonic crystal and its application as a colorimetric sensor. *J. Phys. Chem. C* 111 (2007) 4209.
72. A.C. Vieira, R.L. Moreira, A. Dias. Ab Initio Simulation of Changes in Geometry, Electronic Structure, and Gibbs Free Energy Caused by Dehydration of Hydrotalcites Containing Cl⁻ and CO₃²⁻ Counteranions. *J. Phys. Chem. C* 113 (2009) 13358.
73. D.G. Costa, A.B. Rocha, R. Diniz, W.F. Souza, S.S.X. Chiaro, A.A. Leitro. The structure and stability of interlayer water in Mg/Al-(CO₃²⁻, Cl⁻, NO₃⁻) layered double hydroxides. *J. Phys.Chem. C* 114 (2010) 14133-14140.
74. C. Barriga, W. Jones, P. Malet, V. Rives, M.A. Ulibarri, *Inorg. Synthesis and characterization of polyoxovanadate-pillared Zn-Al layered double hydroxides : An x-ray absorption and diffraction study.* *Chem.* 37 (1998)1812-1820.
75. Z.P. Xu, H.C. Zeng. Compounds Mg_{1-x}Al_x(OH)₂(NO₃)_x·nH₂O As A Continuous Function of Nitrate Anions. *Chem. Mater.* 13 (2001) 4564- 4572.

76. Z.P. Xu, H.C. Zeng. Decomposition pathways of hydrotalcite-like compounds $Mg_{1-x}Al_x(OH)_2(NO_3)_x \cdot nH_2O$ as a continuous function of nitrate anions. *J. Phys. Chem. B* 105 (2001) 1743-749.
77. M. Meyn, K. Beneke, G. Lagaly. Doppelhydroxide und Hydroxidoppelsalze – Synthese, Eigenschaften und Anionenaustauschverhalten. *Inorg. Chem.* 29 (1990) 5201-5207.
78. S. Velu, V. Ramkumar, A. Narayanan, C.S. Swamy. Effect of interlayer anion on the Physicochemical properties of Zinc aluminium hydrotalcites. *J. Mater. Sci.* 32 (1997) 957.
79. A.V. Radha, P.V. Kamath, C. Shivakumara. Conservation of Order, Disorder, and “Crystallinity” during Anion-Exchange Reactions among Layered Double Hydroxides (LDHs) of Zn with Al. *J. Phys. Chem. B* 111 (2007) 3411-3418.
80. Z. Sun, L. Jin, W. Shi, M. Wei, X. Duan. Recent advances in photofunctional guest/layered double hydroxide host composite systems and their applications: experimental and theoretical perspectives. *Chem. Eng. J.* 161 (2010) 293.
81. J. Twu, P.K. Dutta. Structure and reactivity of oxovanadate anions in layered lithium aluminate material. *J. Phys. Chem.* 93 (1989) 7863-7868.
82. M. Iannuzzi, G.S. Frankel. Mechanisms of corrosion inhibition of AA2024-T3 by vanadates. *Corr. Sci.* 49 (2007) 2371–2391.
83. M.L. Zheludkevich, S.K. Poznyak, L.M. Rodrigues, D. Raps, T. Hack, L.F. Dick, T. Nunes, M.G.S. Ferreira. *Cor. Sci.* 51 (2010) 602–611
84. Шабанова Г.Н., Цапко Н.С., Логвинков С.М., Проскурня Е.М., Мокрицкая В.К. //Вопросы химии и химической технологии. 2009. № 4. С.218-221.
85. Chiari G., Gazzoni G., Craig J.R., Gibbs G.V., Louisnathan S.J.//*American Mineralogist*. 1985. Vol. 70. P.969-974.
86. Smith J.V. //*Acta Cryst.* 1953. №6. P. 613-620.
87. Rief F., Kubel H.//*Z. Naturforsch. B: Chem. Sci.* 2007 . V.62b, № 12. P.1535-1542.
88. Lin H.C., Foster W.R. //*Am. Mineral.* 1968. V. 53. P.134-144.
89. Савчук Г.К., Петроченко Т.П., Климза А.А. *Весці НАНБ, серія фіз.-мат. навук.* 2012, №3. С. 106 – 110.

90. Шилин А.Д., Рубаник В.В., Рубаник В.В.(мл.) и др. Перспективные материалы и технологии. Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Из-во УО «ВГТУ», 2013. – 655с.
91. А. А. Мокеев , Ан. А. Мокеев. Дисперсия и неоднородное размытие температурной зависимости диэлектрической восприимчивости сегнетоэлектриков. Труды V международной конференции « Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение» , т. 1, г. Александров, ВНИИСИМС, 2001.
92. И.А. Квасников. Термодинамика и статистическая физика. Т. 3. Теория неравновесных систем. М. УРСС, 2003.
93. А. С. Давыдов . Квантовая механика. М. , Физматгиз, 1963, 748 с.
94. . А. А. Мокеев , Ан. А. Мокеев. Автоколебания поляризации и динамический электрокалорический эффект в сегнетоэлектриках. Сборник трудов VI международной конференции « Рост монокристаллов и тепломассоперенос » , т. 2, г. Обнинск, Россия , 2005.
95. А.А. Мокеев , Ан. А. Мокеев. Уравнение движения электрореологической суспензии. / Механика композиционных материалов и конструкций. Т.6 , № 1 , 2000, с. 117 – 140.
96. Э. В. Бурсиан. Нелинейный кристалл титанат бария. М., Наука, 1974.
97. Ю. В. Радюш, Н.М. Олехнович. Особенности диэлектрического отклика твердых растворов $(1-x)(\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 + x(\text{PbZrO}_3$, синтезированных при высоком давлении .
98. Костин Л.Г., Бучек Л.Т., Шкиль В.М. Схемы ультразвукового прессования порошковых материалов и инженерные методы расчета акустической системы. // Порошковая металлургия — 1971 №4 - С. 13-17. 29.
99. Шилин А.Д., Рубаник В.В., Рубаник В.В.мл. Маркова Л.В.Гамзелева Т.В. Применение высокоэнергетических технологий к получению керамики цирконата титана свинца. Сборник докладов Международной научной конференции «ФТТ - 2011 Актуальные проблемы прочности» / НАН РБ – Минск. 2011. – С 141-143. Том 1 .
100. Рубаник В.В. Шилин А.Д. Пушкарев А.В. Микроструктура керамики, Полученной с использованием ультразвуковой механоактивации и высоких

давлений. Материалы 51-й международной конференции «Актуальные проблемы прочности» / Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАНУ – Харьков. 2011 – С.390

101. Рубаник В.В., Шилин А.Д. Рубаник В.В. мл.Пушкарев А.В. Получение электрически активной керамики с использованием высокоэнергетических технологий. Сборник статей : Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» / УО «ВГТУ». Витебск, 2011. С. 193-196.

102. Rubanik V. V., Rhee C.K. Rubanik V.Jr., Shilin A.D. Ultrasonic mechanoactivation of powder materials. Belarus-Korea science and technology seminar, Minsk, 27 June 2011, p 59.

103.Рубаник В.В. Шилин А.Д. Рубаник В.В. мл. Маркова Л.В. Гамзелева Т.В. Применение высокоэнергетических технологий к получению керамики цирконат-титанат свинца. Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докладов научной конференции, 18-21 октября 2011 г., Минск. В 3т. Т. 1, с. 141-143.

104. Быстриков П.А. Павленко В.Н. Шилин А.Д. Микроструктура керамики, полученной с использованием деформации сдвига и высоких давлений. Тезисы докладов XLIV научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета. / УО «ВГТУ». – Витебск, УО «ВГТУ», 2011. –С43.

105. Быстрикова А.А., Иканович И.К., Шилин А.Д. Использование ударных волн и высоких давлений для получения сегнетокерамики. Материалы докладов 44 научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ». – Витебск, УО «ВГТУ», 2011. – С. 71-72.

106. Быстрикова А.А., Иканович И.К., Новиков В.Ю., Рубаник В.В., Шилин А.Д. Измельчение неметаллических порошков с использованием мощных ультразвуковых колебаний // Материалы докладов 45 Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвящённой году книги / УО «ВГТУ». – Витебск, 2012. – С. 122-124.

107. Быстриков П.А., Павленко В.Н., Новиков В.Ю., Рубаник В.В., Шилин А.Д. Проектирование оборудования и оснастки для ультразвуковой механоактивации // Тезисы докладов 45 Республиканской научно-технической конференции

преподавателей и студентов, посвящённой году книги/ УО «ВГТУ». – Витебск, 2012. – С. 85-86.

108. Рубаник В.В., Рубаник В.В., Салак А.Н.З, Шилин А.Д., Шилина М.В. Измельчение порошковых материалов с использование мощных акустических волн // Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности» 2-5 октября 2012 года Витебск, Беларусь, с.85-89.

109. Клубович В.В., Шилин А.Д., Янусов В.А., Шилина М.В. Микроструктура керамики цирконат-титанат свинца, полученной из механо-активированных порошков. Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии». Сборник статей. 29 мая – 1 июня 2013. Витебск 2013. С. 195-197

110. Клубович В.В., Шилин А.Д., Шилина М.В. Свойства керамики, полученной механоактивацией порошков ультразвуковыми колебаниями. Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии». Сборник статей. 29 мая – 1 июня 2013. Витебск 2013. С. 200-202

111.Клубович В.В., Шилин А.Д., Пушкарев А.В., Шилина М.В.. Сегнетоэлектрические свойства керамики цирконат-титанат свинца, полученной из механо-активированных порошков. Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии». Сборник статей. 29 мая – 1 июня 2013. Витебск 2013. С. 203-205

112. Близнюк Л.А., Петроченко Т.П., Каско В.Н., Рубаник В.В., Шилин А.Д.,Рубаник В.В.(мл.). Влияние ультразвуковой механоактивации на формообразование в диэлектрическом керамическом материале на основе соединения $BaAl_2Si_2O_8$ Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии». Сборник статей. 29 мая – 1 июня 2013. Витебск 2013. С. 136-138.

113. Рубаник В.В., Шилин А.Д.,Рубаник В.В.(мл.), Маркова А.В., Шилина М.В.. Ультразвуковая механоактивация порошков керамики ЦТС-19 при прессовании. Сборник докладов международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела». ФТТ-2013. 15-18 октября 2013., Минск. Т2. С. 177-179.

114. Близнюк Л.А., Петроченко Т.П., Каско В.И., Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл. Ультразвуковая механоактивация керамического материала

BaAl₂Si₂O₈. Актуальные проблемы прочности: тезисы докладов 54-ой международной конференции, Екатеринбург, 11-15 ноября 2013 г. // ИФМ УрО РАН. – Екатеринбург : ИФМ УрО РАН, 2013 г

115. Шилин А.Д., Рубаник В.В., Рубаник В.В.(мл.). Перспективные материалы и технологии. Монография под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Из-во УО «ВГТУ», 2013. – 655с.

116. Чернов П.А., Новиков В.Ю., Быстриков П.А., Павленко В.Н., Рубаник В.В., Шилин А.Д. Ультразвуковая вибрмельница. Тезисы докладов 46 Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов // УО «ВГТУ» – Витебск : УО «ВГТУ», 2013 г. – С. 78.

117. Иканович И.К., Шилин А.Д. Исследование процесса обработки порошковых материалов интенсивными потоками ультразвуковых волн. Материалы докладов 46 Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов // УО «ВГТУ» – Витебск : УО «ВГТУ», 2013 г. – 412 с., С. 168-170.

118. Шилин А.Д., Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.). Способ прессования порошковых материалов заявка на изобретение, МПК В 22 А3 / 02. заявитель Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебский государственный технологический университет.

119. Бабушкин В.Ю. Высокоэнергетические методы получения ультрадисперсных и наноматериалов. Красноярск ИПК СФУ, 2008. 229 с.