

К ВОПРОСУ ОБ ИННОВАЦИОННЫХ СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОКРЫТИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ ИНДУСТРИИ

*И.Ю. Потороко¹, М.Х.А. Аль-Сандокачи¹, Г.Д. Апалькова¹,
А.Е. Майер², Н.В. Попова¹*

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В пищевой промышленности актуальным является использование технологий с применением современных различных наноразмерных добавок. Все способы получения систем, содержащих наноразмерные частицы, подразделяются на методы диспергирования и методы агрегации. Методы диспергирования как широко распространенные в пищевом производстве достаточно изучены и аппаратурно оформлены. Основным недостатком механических способов измельчения является возможность загрязнения измельчаемого порошка материалом размольных тел. Основным приемом минимизации этого явления является изготовление или облицовка рабочих поверхностей износостойкими материалами. В последнее время в исследованиях огнеупорных материалов уделяется внимание особым свойствам спеченного глинозема, имеющего в частности высокую плотность частиц за счет их небольшого размера и как результат повышение механической прочности и устойчивости к истиранию и износу. В этом плане этот материал привлекателен для облицовки рабочих поверхностей размольных агрегатов, в том числе в пищевой промышленности. Анализ нанотехнологий показал целесообразным применение технологии селективного лазерного плавления (спекания) мелкодисперсных порошков. Данная технология многофункциональна, и как инновационное решение может быть использована для получения износостойких материалов при производстве пищевых наносистем путем диспергирования. Одним из актуальных направлений дальнейшего развития целесообразно исследование размолоспособности пищевых систем, обеспечивающих энергоэффективность получения наноразмерных добавок в условиях оптимизации их получения как элемент системного подхода к решению этих вопросов.

Ключевые слова: наноразмерные композиты, добавки, нанопорошки, диспергирование, износостойкие материалы.

Используемое в пищевой промышленности оборудование, как правило, представляет собой сложную систему механизированных и автоматизированных устройств, обеспечивающих выполнение соответствующих операций на всех этапах технологического процесса. Долговечность и надежность работы технологических линий в условиях агрессивной среды является актуальной современной проблемой.

Несмотря на разнообразие процессов, у них есть одна общая черта. На выходе – продукты, которые употребляются в пищу, причем, нередко, без дополнительной обработки. В связи с этим узлы и детали агрегатов должны:

– сохранять биологическую ценность сырья, не ухудшать его органолептические характеристики;

– не быть питательной основой для микробов и не содержать вещества, проникающие в продукцию;

– иметь гладкую, полированную внутреннюю поверхность, без мелких пор и труднодоступных мест, легко и быстро чиститься, мыться и дезинфицироваться;

– не вступать в химическую реакцию со щелочами и кислотами;

– во время обработки – защищать сырье от загрязнений, проникающих из окружающей среды;

Оборудование для пищевого производства используется в довольно специфичных условиях. В качестве рабочей среды нередко выступают коррозионно-активные массы. Регулярно применяются растворы для мойки и дезинфекции. Присутствуют высокие температуры и значительные перепады давления.

По этим причинам устройства должны выдерживать в установленных пределах физическое, химическое и термическое воздействие. Поэтому к подбору материалов для изготовления агрегатов предъявляются особые требования.

Основные группы материалов для изготовления пищевых устройств:

- конструкционные, для деталей, контактирующих с продуктом;
- конструкционные, для элементов, не соприкасающихся с рабочей средой;
- защитные наружные покрытия для деталей, контактирующих с продуктом или моющими средствами;
- упаковка.

Вступать в контакт с пищевыми продуктами, по заключению Минздрава, могут некоторые цветные металлы, легированные коррозионностойкие (нержавеющие) стали, стекло и пищевые полимеры.

В пищевой промышленности в настоящее время актуальны технологии усиления функциональных характеристик продуктов питания на основе применения различных добавок. Зачастую количество и качество пищевых ингредиентов, используемых для этих целей, имеют большую вариабильность характеристик. Это в свою очередь предопределяет новые условия проведения технологических процессов [1, 2]. Обеспечить надежность их ведения возможно при внедрении новых видов покрытий активных поверхностей оборудования.

Активно развивается использование технологий с применением различных наноразмерных добавок, которые позволяют повысить срок хранения. К их числу относятся двуокись кремния (Е 551), окись магния (MgO, Е 530), двуокись титана (Е 171) и др. [3]. К числу разработок химического концерна BASFSE относится технология получения препаратов каротиноидов в форме порошков. Их усвоение происходит лучше, если употребляются мелко диспергированные фракции [4]. Пищевые наноразмерные ингредиенты используются в виде растворенных и нерастворенных компонентов. К числу первых относятся дисперсии белковых препаратов, витаминов, к числу вторых относятся соединения металлов, таких как селена, серебра, кремния, цинка, глинистых минералов. Практическое использование результатов исследований фундаментальной науки в области нанотех-

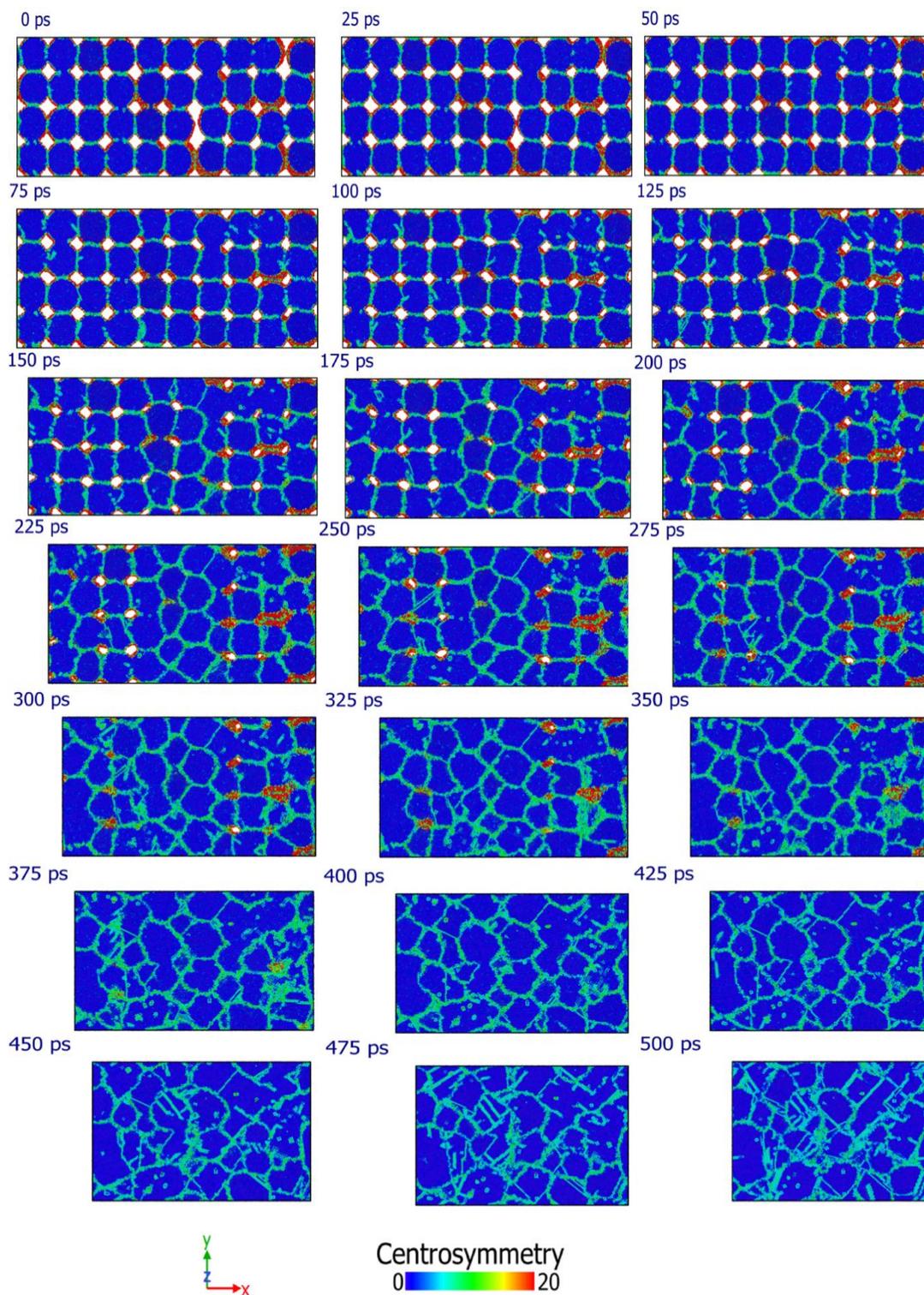
нологий при решении инженерных задач, в частности пищевой индустрии, является одной из приоритетных современных научно-технических проблем [5].

Все способы получения систем, содержащих наноразмерные частицы, подразделяются на методы диспергирования и методы агрегации. Диспергирование как технологический этап определяет эффективность протекания технологий производства целого ряда продуктов как растительного, так и животного происхождения. Использование ультразвукового воздействия в технологии производства напитков позволяет интенсифицировать процесс диспергирования, тем самым улучшая их органолептические показатели и качество в целом [6]. Вместе с тем технология использование ультразвукового воздействия эффективна для гетерогенных систем, содержащих жидкую фазу.

Методы диспергирования твердых материалов как широко распространенные в пищевом производстве достаточно изучены и аппаратурно оформлены. Однако следует помнить, что основным недостатком механических способов измельчения является возможность загрязнения измельчаемого порошка материалом размольных тел. Основным приемом минимизации этого явления, широко применяемом для подготовки проб при прецизионных методах определения химического состава материалов, является изготовление или облицовка рабочих поверхностей износостойкими материалами, в их числе спеченный глинозем [7–10]. Экономический потенциал нанопорошков глинозема с точки зрения их перспективности оценивается как высокий [11].

Спеченный глинозем (окись алюминия, подвергшаяся дополнительной температурной обработке) выпускается в различных фракциях в зависимости от степени измельчения и размеров кристаллов. Различные сорта этого материала выполняют различные функции в составе материалов и придают им дополнительные свойства, и в частности высокую плотность частиц за счет их небольшого размера, как результат – повышение механической прочности и устойчивости к истиранию и износу (см. рисунок). В этом плане материал привлекателен для облицовки рабочих поверхностей размольных агрегатов, в том числе в пищевой промышленности.

Для размольных агрегатов актуальным является износостойкость рабочих поверхно-



Сжатие наночастиц диаметром 6 нм со скоростью деформации 1/нс при температуре 300 К

стей, методы и средства регулирования которой требуют соответствующих исследований и инженерного обеспечения.

Разработанная методология исследования нанопорошков алюминия [12, 13] может слу-

жить основой для исследования и соединений алюминия, в том числе окислов. На рисунке приведены результаты молекулярно-динамического моделирования ударно-волнового компактирования нанопорошка [13].

В настоящее время развиваются методы генерации ультракоротких ударных волн в твердых телах интенсивным лазерным излучением пико- и фемтосекундной длительности, которое может создавать импульсы ударного сжатия длительностью десятикпикосекунд и амплитудой от единиц до десятков гигапаскалей [14–19]. Импульсы ударного сжатия могут использоваться для консолидации порошков металлов и других материалов [20, 21].

Специфика сжатия ударной волной состоит в локализации зоны высоких температур вдоль поверхности компактируемых частиц, что позволяет сохранить микроструктуру их внутренних частей. Такое сжатие может приводить к формированию микро или наноструктурированных металлов [22, 23], неметаллических соединений [24–27] и композитов [28–31]. В настоящее время ударная волна для компактирования порошка генерируется детонацией заряда взрывчатого вещества [27–29], либо высокоскоростным ударником, ускоряемым газовой пушкой [22, 23, 26, 30] или магнитным полем [29], либо мощным лазерным облучением слоя вспомогательного материала [26].

Из всего многообразия современных нанотехнологий технологический процесс селективного лазерного плавления (спекания) достаточно разработан и рассматривается как один из перспективных методов аддитивного производства [32]. Данная технология универсальна, многофункциональна, и как инновационное решение может быть использована для получения износостойких материалов при производстве пищевых наносистем путем диспергирования.

Одним из актуальных направлений дальнейшего развития целесообразно исследование размолосопособности пищевых систем, обеспечивающих энергоэффективность получения наноразмерных добавок в условиях оптимизации их получения как элемент системного подхода к решению этих вопросов.

Таким образом, показана актуальность использования в пищевой промышленности технологий с применением современных наноразмерных добавок, что ставит задачу разработки технологий производства износостойких материалов при производстве пищевых наносистем путем диспергирования. Одним из направлений в части повышения износостойкости материалов является использование плавленого глинозема (окиси алюминия).

Описанные механизмы повышения прочности показали перспективность применения селективного лазерного плавления (спекания) для получения износостойких материалов в пищевом инжиниринге. Разработанная методология исследования нанопорошков алюминия может быть использована для исследования соединений алюминия, в том числе спеченного глинозема, используемого в методах и средствах контроля углеродных материалов при пробоподготовке в высокотехнологичной современной аппаратуре.

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011.

Литература

1. *Научные и практические аспекты технологий продуктов питания функциональной направленности* / И.Ю. Потороко, А.В. Паймулина, Д.Г. Ускова, И.В. Калинина // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 49–59. DOI: 10.14529/food180106
2. *Калинина, И.В. Инновационное развитие предприятий пищевой отрасли: проблемы и перспективы* / Калинина И.В., Фаткуллин Р.И. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*. – 2015. – Т. 3, № 3. – С. 17–22. DOI: 10.14529/food150303
3. *Mars Inc. US Patent US5741505. Edible products having inorganic coatings* Inventor Daniel L. Beyer, Theodore E. Jach, Dennis L. Zak, Ralph A. Jerome, Frank P. DeBrincat. Priority date 1995-01-20.
4. *BASF US Patent US5968251. Production of carotenoid preparations in the form of coldwater-dispersible powders, and the use of the novel carotenoid preparations.* Inventor Helmut Auweter, Heribert Bohn, Herbert Haberkorn, Dieter Horn, Erik Luddecke, Volker Rauschenberger. Priority date 1996-09-09.
5. *Статья «Итоги очередного заседания Совета Директоров РОСНАНО»* // *Nanonewsnet [Электронный ресурс]*. – <http://www.nanonewsnet.ru/news/2011/itogiocherednogo-zasedaniya-soveta-direktorov-rospano-6>.
6. *Фаткуллин, Р.И. Использование ультразвукового воздействия как фактора интенсификации процесса диспергирования в пищевых производствах* / Р.И. Фаткуллин, Н.В. Попова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пи-*

щевые и биотехнологии». – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 41–47. DOI: 10.14529/food150406

7. ISO 14435 Carbonaceous materials for the production of aluminium. Petroleum coke. Determination of trace metals by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry.

8. ISO 8658-2017 Carbonaceous materials for use in the production of aluminium. Green and calcined coke. Determination of trace elements by flame atomic absorption spectroscopy.

9. ISO 8005 Carbonaceous materials used in the production of aluminium. Green and calcined coke. Determination of ash content.

10. Современные представления о плавильных и спеченных огнеупорных заполнителях / М. Шнабель, А. Бур, Д. Шмидтмайер и др. // Новые огнеупоры. – 2016. – № 3. – С. 107–114. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-3-107-114

11. Макаров, Д.В. Прогноз развития мирового рынка нанопорошков / Д.В. Макаров // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2014. – № 1 (8). – С. 97–102. DOI: 10.18454/2079-6641-2014-8-1-97-102

12. Майер, А.Е. Молекулярно-динамическое исследование размерного эффекта при компактировании монодисперсного нанопорошка алюминия / А.Е. Майер, М.Х.А. Аль-Сандокачи // Челябинский физико-математический журнал. – 2018. – Т. 3, вып. 2. – С. 193–201. DOI: 10.24411/2500-0101-2018-13205

13. Аль-Сандокачи, М.Х.А. Молекулярно-динамическое моделирование ударно-волнового компактирования алюминиевого нанопорошка / М.Х.А. Аль-Сандокачи, А.А. Эбель, А.Е. Майер // Челябинский физико-математический журнал. – 2018. – Т. 3, вып. 4. – С. 453–460. DOI: 10.24411/2500-0101-2018-13406

14. Pulsetrain-burst mode, ultrafast-laser interactions with 3D viable cell cultures as a model for soft biological tissues / Z. Qian, A. Mordovanakis, J.E. Schoenly et al. // Biomedical Optics Express. – 2014. – V. 5, № 1. – P. 208–222.

15. Laser ablation of gold: Experiment and atomistic simulation / S.V. Starikov, V.V. Stegailov, G.E. Norman et al. // Letters to Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2011. – V. 93, № 11. – P. 642–647.

16. Electron-ion relaxation, phase transitions, and surface nanostructuring produced by ultrashort laser pulses in metals / N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov et al. // Contribu-

tions to Plasma Physics. – 2013. – V. 53, № 10. – P. 796–810.

17. Behavior of aluminum near an ultimate theoretical strength in experiments with femtosecond laser pulses / S.I. Ashitkov, M.B. Agranat, G.I. Kanel et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. – 2010. – V. 92, № 8. – P. 516–520.

18. Achievement of ultimate values of the bulk and shear strengths of iron irradiated by femtosecond laser pulses / S.I. Ashitkov, P.S. Komarov, M.B. Agranat et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. – 2013. – V. 98, № 7. – P. 384–388.

19. Mechanical and optical properties of vanadium under shock picosecond loads / S.I. Ashitkov, P.S. Komarov, E.V. Struleva et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. – 2015. – V. 101, № 4. – P. 276–281.

20. Gourdin, W.H. Dynamic consolidation of metal powders / W.H. Gourdin // Progress in Materials Science. – 1986. – V. 30, № 1. – P. 39–80.

21. Meyers, M.A. Shock consolidation: microstructurally-based analysis and computational modeling / M.A. Meyers, D.J. Benson, E.A. Olevsky // Acta Materialia. – 1999. – V. 47, № 7. – P. 2089–2108.

22. Fredenburg, D.A. Shock consolidation of nanocrystalline 6061-T6 aluminum powders / D.A. Fredenburg, N.N. Thadhani, T.J. Vogler // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – V. 527, № 15. – P. 3349–3357.

23. Plastic deformation and microstructural evolution during the shock consolidation of ultrafine copper powders / D.-H. Ahn, W. Kim, M. Kang et al. // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – V. 625. – P. 230–244.

24. Shock-wave compaction of the granular medium initiated by magnetically pulsed accelerated striker / G.Sh. Boltachev, N.B. Volkov, V.V. Ivanov, A.S. Kaygorodov // Acta Mechanica. – 2009. – V. 204. – P. 37–50.

25. Dai, C. Shock-compression response of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles / C. Dai, N.N. Thadhani // Acta Materialia. – 2011. – V. 59, № 2. – P. 785–796.

26. Molian, P. Laser shock wave consolidation of micropowder compacts of fully stabilised zirconia with addition of nanoparticles / P. Molian, V.R. Baerga // Advances in Applied Ceramics. – 2011. – V. 110, № 2. – P. 120–123.

27. Shock-wave consolidation of nanostructured bismuth telluride powders / J. Beck, M. Al-

varado, D. Nemir et al. // *Journal of Electronic Materials*. – 2012. – V. 41, № 6. – P. 1595–1600.

28. The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites / S.A. Vorozhtsov, D.G. Eskin, J. Tamayo et al. // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2015. – V. 46, № 7. – P. 2870–2875.

29. Kulkov, S. Structure, phase content and mechanical properties of aluminium with hard particles after shock-wave compaction / S. Kulkov, S. Vorozhtsov, I. Turuntaev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – V. 602. – P. 012019.

30. Evaluation of tensile strength of Al7075-SiC nanocomposite compacted by gas gun using spherical indentation test and neural networks / A. Atrian, G.H. Majzoobi, S.H. Nourbakhsh et al. // *Advanced Powder Technology*. – 2016. – V. 27, № 4. – P. 1821–1827.

31. Tavakol, M. Shock wave sintering of Al/SiC metal matrix nano-composites: A molecular dynamics study / M. Tavakol, M. Mahnama, R. Naghdabadi // *Computational Materials Science*. – 2016. – V. 125. – P. 255–262.

32. Аль-Сандыкачи, М.Х.А. Селективное лазерное плавление / М.Х.А. Аль-Сандокачи // *Точная наука*, – 2016. – Вып. 2. – С. 3–7.

Потороко Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), irina_potoroko@mail.ru

Аль-Сандокачи Мохаммад Худайр Аббас, аспирант, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), mohammadkhudhair60@gmail.com

Апалькова Галия Давлетхановна, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), apalkovagd@susu.ru

Майер Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, Челябинский государственный университет (г. Челябинск), mayer@csu.ru

Попова Наталия Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), nvporova@susu.ru

Поступила в редакцию 10 июня 2018 г.

DOI: 10.14529/food180403

ON THE INNOVATIVE WAYS OF OBTAINING MATERIALS FOR THE PROCESSING EQUIPMENT SURFACE COATING IN FOOD INDUSTRY ENTERPRISES

**I.Yu. Potoroko¹, M.Kh.A. Al-Sandokachi¹, G.D. Apalkova¹,
A.E. Mayer², N.V. Popova¹**

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The technologies involving the use of different modern nano-sized food additives are relevant in the food industry. All methods for obtaining systems containing nano-sized particles are divided into dispersion and aggregation methods. The dispersion methods as widely known in the food production are well-studied and formalised in terms of equipment. The main disadvantage of mechanical dispersion methods is a possibility of mixing the grinding powder with milling agents. The basic approach to minimization is the production or facing of working areas by wear-resistant

materials. The recent studies of fire-proof materials focus on the properties of sintered alumina, which has a high density of particles due to their small size and as a result the increase in mechanical resistance and stability to wear and tear. In this context, this material is favourable to facing the working areas of grinding aggregates, including in the food industry. The nanotechnology analysis proved the technology of selective laser melting of fine powders to be desirable. This technology is multi-functional, and as an innovative decision can be used to get wear-resistant materials when producing the food nanosystems by dispersion. As one of the promising areas for further development is the study on grinding capacity of food systems ensuring the energy-saving production of nano-sized food additives in the context of optimization of their preparation as an element of system approach to the problem solving.

Keywords: nano-sized composites, additives, nanopowders, dispersion, wear-resistant materials.

References

1. Potoroko I.Yu., Paimulina A.V., Uskova D.G., Kalinina I.V. Scientific and Practical Aspects of Functional Food Technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 49–59. (in Russ.) DOI: 10.14529/food180106
2. Kalinina I.V., Fatkullin R.I. Innovative Development of the Food Industry: Challenges and Prospects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2015, vol. 3, no. 3, pp. 17–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/food150303
3. Mars Inc. US Patent US5741505. Edible products having inorganic coatings Inventor Daniel L. Beyer, Theodore E. Jach, Dennis L. Zak, Ralph A. Jerome, Frank P. DeBrincat. Priority date 1995-01-20.
4. BASF US Patent US5968251. Production of carotenoid preparations in the form of coldwater-dispersible powders, and the use of the novel carotenoid preparations. Inventor Helmut Auweter, Heribert Bohn, Herbert Haberkorn, Dieter Horn, Erik Luddecke, Volker Rauschenberger. Priority date 1996-09-09.
5. Itogi ocherednogo zasedaniya Soveta Direktorov ROSNANO [The results of a regular meeting of the RUSNANO Executive Board]. *Nanonewsnet*. Available at: <http://www.nanonewsnet.ru/news/2011/itogi-ocherednogo-zasedaniya-soveta-direktorov-rosnano-6>.
6. Fatkullin R.I., Popova N.V. The Use of Ultrasonic Exposure as the Factor of Intensification of Dispersion Process in Food Production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 41–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/food150406
7. *ISO 14435 Carbonaceous materials for the production of aluminium. Petroleum coke*. Determination of trace metals by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry.
8. *ISO 8658-2017 Carbonaceous materials for use in the production of aluminium. Green and calcined coke*. Determination of trace elements by flame atomic absorption spectroscopy.
9. *ISO 8005 Carbonaceous materials used in the production of aluminium. Green and calcined coke*. Determination of ash content.
10. Schnabel' M., Buhr A., Schmidmeier D., Chatterjee S., Dutton J. The modern concepts of the fused and sintered refractory aggregates. *Novye ognepory* [New Refractories], 2016, no. 3, pp. 107–114. (in Russ.) DOI: 10.17073/1683-4518-2016-3-107-114
11. Makarov D.V. Global market forecast nanopowders. *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki*, 2014, no. 1 (8), pp. 97–102. (in Russ.) DOI: 10.18454/2079-6641-2014-8-1-97-102
12. Mayer A.E., Al-Sandoqachi M.Kh.A. Molecular-dynamic study of the size effect in the compacting of monodisperse aluminum nanopowder. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*, 2018, vol. 3, iss. 2, pp. 193–201. (in Russ.) DOI: 10.24411/2500-0101-2018-13205
13. Al-Sandoqachi M.Kh.A., Ebel A.A., Mayer A.E. Molecular-dynamic simulation of shock-wave compacting of aluminum nanopowder. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*, 2018, vol. 3, iss. 4, pp. 453–460. (in Russ.) DOI: 10.24411/2500-0101-2018-13406
14. Qian Z., Mordovanakis A., Schoenly J.E., Covarrubias A., Feng Y., Lilge L., Marjoribanks R.S. Pulsetrain-burst mode, ultrafast-laser interactions with 3D viable cell cultures as a model for soft biological tissues. *Biomedical Optics Express*, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 208–222. DOI: 10.1364/BOE.5.000208

15. Starikov S.V., Stegailov V.V., Norman G.E., Fortov V.E., Ishino M., Tanaka M., Hasegawa N., Nishikino M., Ohba T., Kaihori T., Ochi E., Imazono T., Kavachi T., Tamotsu S., Pikuz T.A., Skobelev I.Y., Faenov A.Y. Laser ablation of gold: Experiment and atomistic simulation. *Letters to Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2011, vol. 93, no. 11, pp. 642–647. DOI: 10.1134/S0021364011110129
16. Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V., Petrov Yu.V., Khokhlov V.A., Ashitkov S.I., Khishchenko K.V., Migdal K.P., Il'nitsky D.K., Emirov Yu.N., Komarov P.S., Shepelev V.V., Miller C.W., Oleynik I.I., Agranat M.B., Andriyash A.V., Anisimov S.I., Fortov V.E. Electron-ion relaxation, phase transitions, and surface nanostructuring produced by ultrashort laser pulses in metals. *Contributions to Plasma Physics*, 2013, vol. 53, no. 10, pp. 796–810. DOI: 10.1002/ctpp.201310049
17. Ashitkov S.I., Agranat M.B., Kanel G.I., Komarov P.S., Fortov V.E. Behavior of aluminum near an ultimate theoretical strength in experiments with femtosecond laser pulses. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2010, vol. 92, no. 8, pp. 516–520. DOI: 10.1134/S0021364010200051
18. Ashitkov S.I., Komarov P.S., Agranat M.B., Kanel G.I., Fortov V.E. Achievement of ultimate values of the bulk and shear strengths of iron irradiated by femtosecond laser pulses. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2013, vol. 98, no. 7, pp. 384–388. DOI: 10.1134/S0021364013200022
19. Ashitkov S.I., Komarov P.S., Struleva E.V., Agranat M.B., Kanel G.I. Mechanical and optical properties of vanadium under shock picosecond loads. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2015, vol. 101, no. 4, pp. 276–281. DOI: 10.1134/S0021364015040049
20. Gourdin W.H. Dynamic consolidation of metal powders. *Progress in Materials Science*, 1986, vol. 30, no. 1, pp. 39–80. DOI: 10.1016/0079-6425(86)90003-4
21. Meyers M.A., Benson D.J., Olevsky E.A. Shock consolidation: microstructurally-based analysis and computational modeling. *Acta Materialia*, 1999, vol. 47, no. 7, pp. 2089–2108. DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00083-X
22. Fredenburg D.A., Thadhani N.N., Vogler T.J. Shock consolidation of nanocrystalline 6061-T6 aluminum powders. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527, no. 15, pp. 3349–3357. DOI: 10.1016/j.msea.2010.02.036
23. Ahn D.-H., Kim W., Kang M., Park L.J., Lee S., Kim H.S. Plastic deformation and microstructural evolution during the shock consolidation of ultrafine copper powders. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 625, pp. 230–244. DOI: 10.1016/j.msea.2014.12.012
24. Boltachev G.Sh., Volkov N.B., Ivanov V.V., Kaygorodov A.S. Shock-wave compaction of the granular medium initiated by magnetically pulsed accelerated striker. *Acta Mechanica*, 2009, vol. 204, pp. 37–50. DOI: 10.1007/s00707-008-0046-2
25. Dai C., Thadhani N.N. Shock-compression response of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, no. 2, pp. 785–796. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.10.022
26. Molian P., Baerga V.R. Laser shock wave consolidation of micropowder compacts of fully stabilised zirconia with addition of nanoparticles. *Advances in Applied Ceramics*, 2011, vol. 110, no. 2, pp. 120–123. DOI: 10.1179/1743676110Y.0000000011
27. Beck J., Alvarado M., Nemir D., Nowell M., Murr L., Prasad N. Shock-wave consolidation of nanostructured bismuth telluride powders. *Journal of Electronic Materials*, 2012, vol. 41, no. 6, pp. 1595–1600. DOI: 10.1007/s11664-011-1878-4
28. Vorozhtsov S.A., Eskin D.G., Tamayo J., Vorozhtsov A.B., Promakhov V.V., Averin A.A., Khrustalyov A.P. The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, vol. 46, no. 7, pp. 2870–2875. DOI: 10.1007/s11661-015-2850-3
29. Kulkov S., Vorozhtsov S., Turuntaev I. Structure, phase content and mechanical properties of aluminium with hard particles after shock-wave compaction. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 602, pp. 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/602/1/012019
30. Atrian A., Majzoobi G.H., Nourbakhsh S.H., Galehdari S.A., Masoudi Nejad R. Evaluation of tensile strength of Al₇₀Si₃₀ nanocomposite compacted by gas gun using spherical indentation test and neural networks. *Advanced Powder Technology*, 2016, vol. 27, no. 4, pp. 1821–1827. DOI: 10.1016/j.apt.2016.06.015

31. Tavakol M., Mahnama M., Naghdabadi R. Shock wave sintering of Al/SiC metal matrix nanocomposites: A molecular dynamics study. *Computational Materials Science*, 2016, vol. 125, pp. 255–262. DOI: 10.1016/j.commatsci.2016.08.032

32. Al-Sandoqachi M.Kh.A. Selektivnoye lazernoye plavleniye [Selective laser melting]. *Tochnaya nauka* [Exact sciences], 2016, iss. 2, pp. 3–7.

Irina Yu. Potoroko, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, irina_potoroko@mail.ru

Al-Sandokachi Mohammed Khudair Abbas, Postgraduate student, South Ural State University, Chelyabinsk, mohammadkhudhair60@gmail.com

Galiya D. Apalkova, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, apalkovagd@susu.ru

Aleksandr E. Mayer, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, head of the Department of General and Applied Physics, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, mayer@csu.ru

Natalia V. Popova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, nvpopova@susu.ru

Received June 10, 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

К вопросу об инновационных способах получения материалов для покрытий поверхностей технологического оборудования на предприятиях пищевой индустрии / И.Ю. Потороко, М.Х.А. Аль-Сандокачи, Г.Д. Апалькова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 20–28. DOI: 10.14529/food180403

FOR CITATION

Potoroko I.Yu., Al-Sandokachi M.Kh.A., Apalkova G.D., Mayer A.E., Popova N.V. On the Innovative Ways of Obtaining Materials for the Processing Equipment Surface Coating in Food Industry Enterprises. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 20–28. (in Russ.) DOI: 10.14529/food180403