

УДК 544.032.2+544.032.7+54-116

Разложение толуола при обработке в планетарной шаровой мельнице совместно с порошками алюминия и магния

В. В. Аксенова¹, О. М. Канунникова², И. Н. Бурнышев¹, В. И. Ладьянов¹

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

² Удмуртский государственный аграрный университет, Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 11

Аннотация. Методом ИК-спектроскопии выполнены сравнительные исследования продуктов жидкой фазы при механоактивации в шаровой планетарной мельнице толуола с порошками Al и Mg. Показано, что интенсивность структурно-химических превращений жидкой фазы зависит от взаимодействия продуктов разложения толуола с металлическим порошком. Гидридообразующий магний замедляет гидрирование бензольного кольца и разложение толуола не происходит даже после 30 ч обработки. Механокрекинг толуола в присутствии алюминия начинается после 20 ч. Размеры частиц Al и Mg в процессе измельчения практически не отличаются.

Ключевые слова: толуол, разложение, алюминий, магний, ИК-спектроскопия, термодесорбция водорода.

✉ Валерия Аксенова, e-mail: aksenova@udman.ru

Decomposition of Toluene During Processing in a Planetary Ball Mill Together with Aluminum and Magnesium Powders

Valeriya V. Aksenova¹, Olga M. Kanunnikova², Ivan N. Burnyshev¹, Vladimir I. Lad'yanov¹

¹ Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St, Izhevsk, 426067, Russian Federation)

² Udmurt State Agricultural University (11, Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation)

Summary. To avoid agglomeration of plastic particles during mechanical activation (MA), a process control agent (PCA) is usually used, which is deposited on the surface of the particles and prevents the Me-Me interaction. At the same time, the crushed powders are polluted by the PCA decomposition products – carbon and hydrogen. The aim of the work was to study the effect of metal on the structural and chemical transformations of the liquid phase during the MA of toluene together with metal powders. To study the interaction of metal and toluene under the MA conditions, the powders of hydride-forming magnesium and carbide-forming aluminum were used in the present work. High-energy grinding was carried out in a planetary mill at a rotational speed of 600 rpm and processing time of 30 hours. The solid phase was studied by hydrogen thermal desorption spectroscopy (TDS) and for studying the liquid phase attenuated total reflection (ATR) was used. Based on the joint analysis of the TDS and ATR data, it is shown that the intensity of the structural and chemical transformations of the liquid phase depends on the interaction of the toluene decomposition products with the metal powder. In the process of mechanical cracking of toluene, the transformation of toluene → alkenes → alkanes occurs because of hydrogenation reactions of the aromatic ring. At the same time, the metal powder present in the reaction medium at MA and sorbing the toluene decomposition products has a significant effect on the structural and chemical transformations of the organic phase. Magnesium absorbs hydrogen, thereby preventing the hydrogenation of the benzene ring, and the toluene decomposition does not occur even after 30 hours of treatment. In the presence of aluminum, the decomposition of toluene begins after 20 h. The particle sizes of the aluminum and magnesium powders after 5 hours of processing by grinding practically do not differ.

Keywords: toluene, decomposition, aluminum, magnesium, IR spectroscopy, thermal desorption of hydrogen.

✉ Valeriya Aksenova, e-mail: aksenova@udman.ru

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнергетическое шаровое измельчение широко используется для получения материалов с улучшенными физико-механическими свойствами и новых фаз: пересыщенные твердые растворы, интерметаллы, квазикристаллические сплавы, высокоэнтропийные сплавы, аморфные сплавы и композиты [1–3]. По сравнению с обычными поликристаллическими аналогами, наноструктурирование позволяет обеспечить значительное улучшение предела текучести, ударной вязкости, усталостной долговечности, коррозионной стойкости и твердости, что объясняется размером нанозерен. [4]. Механоактивация (МА) в высокоэнергетической шаровой мельнице часто приводит к холодной сварке и агломерации пластичных частиц. Чтобы достичь баланса между холодной сваркой и разрушением, вводят подходящие органические поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые осаждаются на поверхности частиц и предотвращают взаимодействие Ме-Ме [5–8]. Добавление ПАВ при высокоэнергетическом шаровом измельчении оказывает влияние на морфологию и размер частиц порошка [например, 9], некоторые ПАВ действуют как температурные замедлители и являются эффективным средством предотвращения воспламенения образца во время измельчения [10]. Измельчаемые порошки при МА загрязняются продуктами разложения ПАВ – углеродом и водородом [11, 12]. Однако органические добавки можно рассматривать как источник водорода и углерода для образования карбидов, гидридов и карбогидридов [13–16]. Процессы структурно-химических превращений ПАВ и абсорбции металлическим порошком продуктов разложения конкурируют между собой. Использование разных металлов позволяет реализовывать избирательность абсорбции. Таким образом, процессы при МА сложны и зависят как от обрабатываемого материала, так и условий синтеза, поэтому условия измельчения необходимо рассматривать для каждой отдельной системы.

Для исследования взаимодействия металла и толуола в условиях механоактивации (МА) в настоящей работе использовались порошки гидридообразующего магния и карбидообразующего алюминия.

Целью работы являлось исследование влияния металла (Al и Mg) на структурно-химические превращения жидкой фазы при МА толуола совместно с порошками Al и Mg.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовались: толуол (99.5 %, "чда", Экос-1), порошки Al (не менее 99.2 %, марка АСД-1) и Mg (не менее 99 %, марка МПФ-4).

Механохимическую активацию (МА) порошков Al (Mg) в среде толуола проводили в шаровой планетарной мельнице АГО-2С (ЗАО "НОВИЦ"). Стаканы мельницы объемом по 150 мл изготовлены из стали марки 40Х13, шары – из ШХ15, диаметр шаров – 8 мм, скорость вращения водила мельницы – 600 об/мин, а стаканов вокруг собственной оси – 1290 об/мин. При загрузке барабанов, масса шаров составляла 200 г, порошка Al (Mg) – 10 г, а объем толуола – 50 мл. Измельчение проводилось интервалами по 0.5 ч, с выдержкой 0.5 ч между интервалами. Общее время доводилось до 5 ч, 10 ч, 15 ч, 20 ч и 30 ч. Каждый образец готовился отдельно, без промежуточных отборов проб для спектрального анализа.

Инфракрасные спектры жидкой фазы были получены с помощью ИК-Фурье спектрометра ФСМ-1202 (Инфраспек) с применением приставки многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО или attenuated total reflection ATR) МНПВО36 с призмой из ZnSe. ИК-спектры регистрировали в среднем ИК диапазоне ($400 - 4000 \text{ см}^{-1}$) с оптическим разрешением 1 см^{-1} и накоплением 14 сканов.

Данные по термодесорбции (ТДС) водорода из образцов порошка были получены на газоанализаторе G8 Galileo H (Bruker). В качестве газа-носителя использовался азот (99.996 %). При анализе образцы массой $0.19 \div 0.22 \text{ г}$ нагревались в инфракрасной трубчатой печи в диапазоне температур $200 - 950 \text{ }^\circ\text{C}$, затем выдерживались 10 мин при температуре

950 °С, скорость нагрева составляла 21.3 °С/мин. Инструментальная ошибка определения концентрации водорода составляла 1 %. Статистическая погрешность определения водорода не превышала 0.2 мас. %.

Размеры частиц порошков Al и Mg оценили с помощью изображений, полученных на сканирующем электронном микроскопе Thermo Fisher Scientific Quattro S.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью приставки МНПВО удается получать ансамбль ИК-спектров с хорошей воспроизводимостью. При этом существенно снижается вероятность влияния толщины анализируемого слоя образца на интерпретацию спектров и позволяет использовать при обработке спектров разностную спектроскопию. Для увеличения контрастности спектров МНПВО путем вычитания спектра исходного толуола были получены их разностные спектры. На рис. 1 и 2 представлены разностные спектры жидкой фазы после МА толуола с порошками алюминия и магния соответственно.

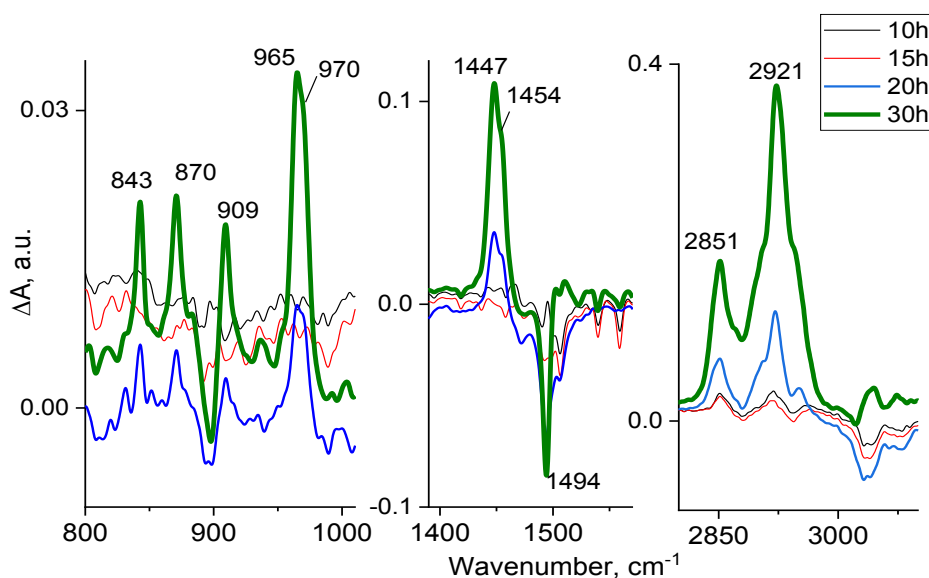


Рис. 1. Разностные ИК-спектры поглощения жидкой фазы на разных стадиях обработки в планетарной мельнице смеси Al + толуол

Fig. 1. Differential IR absorption spectra of the liquid phase at different stages of processing in a planetary mill of a mixture of Al + toluene

Наиболее информативными являются области спектра скелетных С-Н колебаний ароматического кольца и неплоскостных колебаний С=C связей в олефинах (область 800 – 1000 см⁻¹), деформационных колебаний метильных и метиленовых групп (1400 – 1700 см⁻¹), а также валентных колебаний С-Н связей в аренах и алканах (2800 – 3100 см⁻¹).

При высокоэнергетическом помоле толуола совместно с порошком Al (рис. 1) заметные изменения в разностных ИК-спектрах, появляются после 20 ч МА и свидетельствуют о начале механокрекинга толуола. Скелетные С-Н колебания ароматического кольца в области 700 – 900 см⁻¹ (пики при 843 и 873 см⁻¹) связаны с колебаниями С-Н связи в алкилбензолах с разным типом замещения. Наряду с характеристическими полосами, обусловленными колебаниями бензольного кольца, отмечаются полосы при 909, 965 и 970 см⁻¹, которые соответствуют веерным колебаниям С-Н в изомерах олефинов. Так поглощение при 970 – 965 см⁻¹ характерно для транс-изомера [17]. Кроме того, известно [18], что полосы, соответствующие веерным колебаниям, высоко характеристичны для алкильных заместителей у этиленовых С=C групп. Веерные колебания С-Н у алкил-замещенных олефинов дают полосы поглощения около 910 см⁻¹ для виниловых групп и около 970 см⁻¹

для транс 1,2-замещенных алкенов. Наблюдаются значительные изменения и в области деформационных С-Н колебаний метильных и метиленовых групп ($1400 - 1700 \text{ см}^{-1}$). После 20 ч МА увеличивается интенсивность перекрывающихся полос, связанных с деформационными колебаниями CH_3 и CH_2 групп ($1430 - 1460 \text{ см}^{-1}$). Прежде всего, это вызвано смещением полосы поглощения метильной группы в ароматических соединениях при изменении типа замещения. Кроме того, полоса при $\sim 1450 \text{ см}^{-1}$ может быть приписана деформационным колебаниям CH_2 группы в циклогексане, а полоса при $\sim 1457 \text{ см}^{-1}$ – характерна для колебаний CH_3 группы в изомерах алкенов [18]. В области валентных колебаний алифатических групп наблюдается увеличение интенсивности полосы при $\sim 2921 \text{ см}^{-1}$, соответствующей асимметричным колебаниям метильной группы в толуоле $\nu_{\text{as}}(\text{CH}_3)$. Это может означать, во-первых, увеличение количества метильных групп, присоединенных к бензольному кольцу – аренов с разным типом замещения. Во-вторых, полоса при $\sim 2921 \text{ см}^{-1}$ может перекрываться с полосой, ответственной за асимметричные колебания метиленовой группы $\nu_{\text{as}}(\text{CH}_2)$, что связано с появлением в реакционной среде алифатических соединений. Поддерживает этот вывод и увеличение интенсивности полосы при $\sim 2851 \text{ см}^{-1}$, ответственной за симметричные валентные колебания CH_2 в алканах. В тоже время уменьшается интенсивность ароматической полосы при $\sim 1495 \text{ см}^{-1}$, что связано с крекингом толуола. Таким образом, анализ ИК-спектров свидетельствует о том, что основной состав жидкой фазы при МА системы Al+толуол представлен ароматическими соединениями, но при этом присутствуют изомеры аренов и олефинов.

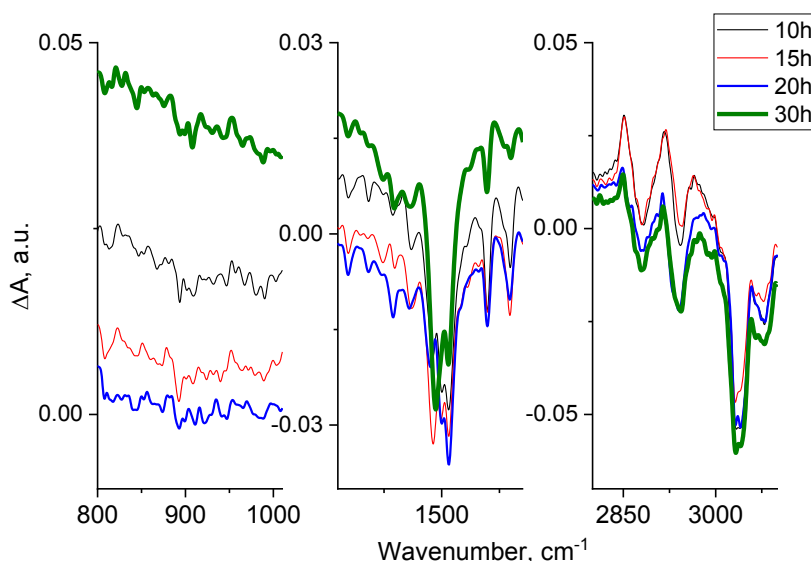


Рис. 2. Разностные ИК-спектры поглощения жидкой фазы на разных стадиях обработки в планетарной мельнице смеси Mg + толуол

Fig. 2. Differential IR absorption spectra of the liquid phase at different stages of processing in a planetary mill of a mixture of Mg + toluene

При высокоэнергетическом помоле толуола с порошком Mg (рис. 2) даже после 30 ч МА существенных изменений в структурно-химическом состоянии жидкой фазы не наблюдается. Можно предположить, что поскольку магния порошок в процессе механообработки поглощает водород, то гидрирование бензольного кольца незначительно.

Относительное соотношение ароматических и неароматических структур в жидкой фазе образцов удобно оценивать в области спектра $1300 - 1500 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3, а). Полосы поглощения при ~ 1379 и $\sim 1455 \text{ см}^{-1}$ связаны с деформационными колебаниями метильных и метиленовых групп, а поглощение при $\sim 1495 \text{ см}^{-1}$ ($1480 - 1500 \text{ см}^{-1}$) – с валентными колебаниями ароматического кольца. Зависимость относительной площади ароматической полосы при $\sim 1495 \text{ см}^{-1}$ от времени помола представлена на рис. 3, б.

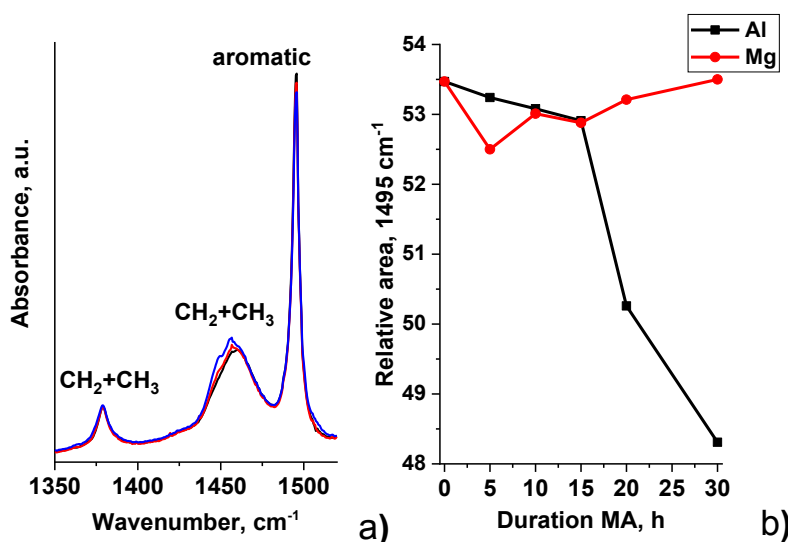


Рис. 3. МНПВО спектры жидкой фазы при разных временах МА (а), изменение относительной интегральной интенсивности (в диапазоне 1350 – 1520 см⁻¹) полосы валентных колебаний ароматического кольца (1495 см⁻¹) при МА с порошками Al и Mg (б)

Fig. 3. ATR spectra of the liquid phase at different MA times (a), change in the relative integral intensity (in the range of 1350 – 1520 cm⁻¹) band of the stretching vibrations of the aromatic ring (1495 cm⁻¹) at MA with Al and Mg powders (b)

В системе Mg+толуол соотношение аренов и олефинов в жидкой среде практически не меняется до 30 ч обработки. Незначительные изменения связаны с реакциями элиминирования метильной группы и образованием аренов с разным типом замещения бензольного кольца. В то время как в системе Al+толуол после 15 ч МА доля аренов начинает постепенно уменьшаться.

Таким образом, в процессе механокрекинга толуола происходит превращение толуол → алкены → алканы в результате реакций гидрирования ароматического кольца. При этом металлический порошок, присутствующий в реакционной среде при МА и сорбирующий продукты разложения толуола, оказывает существенное влияние на структурно-химические превращения органической фазы. Мы проанализировали сорбционную способность порошков Al и Mg. На рис. 4 представлены данные ТДС водорода из металлических порошков на разных этапах механообработки.

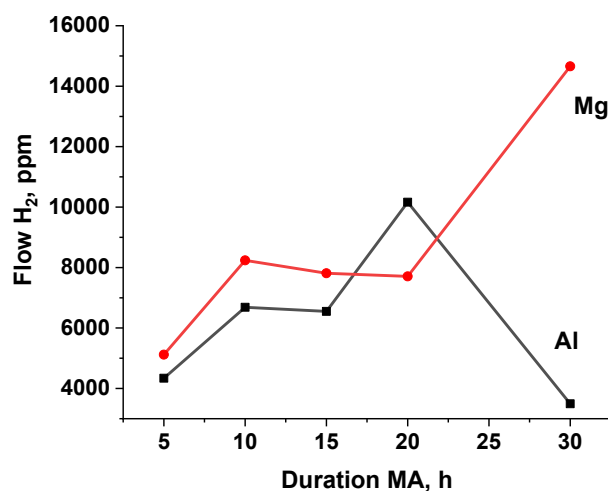


Рис. 4. Зависимость десорбции водорода из порошков Al и Mg от продолжительности МА. Нагрев до 950 °С

Fig. 4. Dependence of hydrogen desorption from Al and Mg powders on the duration of MA. Heating up to 950 °C

Значительные различия в сорбции водорода для представленных металлов наблюдаются после 20 ч МА. У порошка алюминия резко уменьшается количество абсорбированного водорода, поскольку начинается разрушение ароматического кольца, в результате реакций гидрирования. Порошок магния, напротив, после 20 ч МА начинает активно абсорбировать водород, что замедляет превращения в жидкой среде.

Кроме того, при высокоэнергетических механических воздействиях происходит разрушение частиц металлического порошка, и тем самым образуются свежие, активные поверхности, вступающие в контакт с жидкой органической фазой. На рис. 5 представлена зависимость размеров частиц (определены по данным РЭМ) порошков Al и Mg от продолжительности МА.

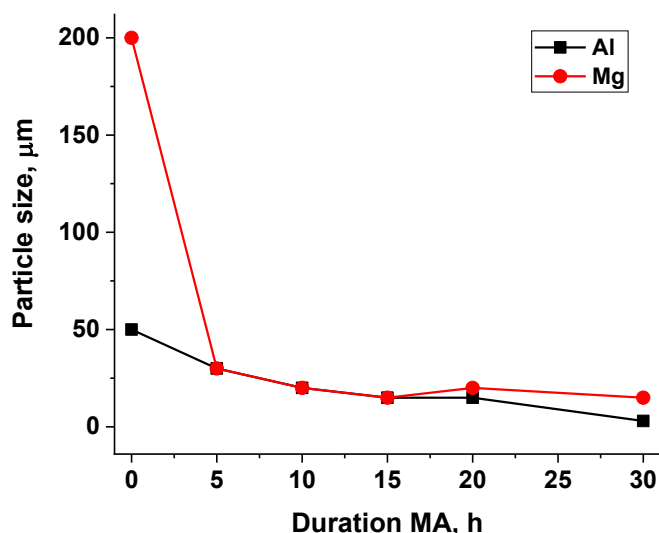


Рис. 5. Размеры частиц порошков Al и Mg на последовательных временах МА в толуоле

Fig. 5. The particle sizes of Al and Mg powders at successive mechanical activation times in toluene

Исходные порошки значительно отличаются по степени дисперсности: частицы магния в четыре раза крупнее, чем частицы алюминия. Уже после 5 ч обработки при высокоэнергетическом измельчении в планетарной мельнице размеры частиц Al и Mg становятся одинаковыми. Таким образом, влияние площади поверхности частиц порошков на абсорбцию водорода можно исключить. Основным фактором, определяющим абсорбцию водорода, а, значит, и реакции в жидкой среде является средство металла (Al или Mg) к водороду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокоэнергетическое шаровое измельчение порошков Al и Mg в среде толуола приводит к структурно-химическим превращениям в жидкой органической фазе. Методом ИК-спектроскопии проанализированы изменения полос поглощения, характеризующих состояние функциональных группировок толуола. Показано, что при скорости вращения водила мельницы 600 об/мин механокрекинг ароматических структур в присутствии алюминия начинается после 20 ч обработки. При обработке совместно с порошком магнием разложение толуола не регистрируется даже после 30 ч МА.

Результаты совместного анализа термодесорбции водорода из порошков Al (Mg) и ИК-спектроскопии жидкой фазы указывают на то, что высокая сорбционная способность Mg замедляет разложение толуола, в то время как Al мало поглощает водород, тем самым инициируя в жидкой фазе реакции гидрирования аренов.

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ гос. регистрации 121030100002-0 и 1021032422167-7-1.3.2).

Studies were performed using equipment of Core shared research facilities "Center of physical and physical-chemical methods of analysis, investigations of properties and characteristics surface, nanostructures, materials and samples" of UdmFRC UB RAS within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state registration number 121030100002-0 and 1021032422167-7-1.3.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suryanarayana C., Al-Joubori A. A., Wang Z. Nanostructured Materials and Nanocomposites by Mechanical Alloying: An Overview // *Metals and Materials International*, 2022, vol. 28, pp. 41-53. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-00998-5>
2. El-Eskandarany M. S., Al-Hazza A., Al-Hajji L. A., Ali N., Al-Duweesh A. A., Banyan M. and Al-Ajmi F. Mechanical Milling: A Superior Nanotechnological Tool for Fabrication of Nanocrystalline and Nanocomposite Materials // *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 10, 2484. <https://doi.org/10.3390/nano11102484>
3. Michalchuk A. A., Boldyreva E. V., Belenguer A. M., Emmerling F., Boldyrev V. V. Tribochemistry, Mechanical Alloying, Mechanochemistry: What is in a Name? // *Frontiers in Chemistry*, 2021, vol. 9, 685789. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.685789>
4. Kushwaha A. K., John M., Misra M. and Menezes P. L. Nanocrystalline Materials: Synthesis, Characterization, Properties, and Applications // *Crystals*, 2021, vol. 11, no. 11, 1317. <https://doi.org/10.3390/cryst11111317>
5. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling // *Progress in Materials Science*, 2001, vol. 46, iss. 1-2, pp. 1-184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
6. Shaw L., Villegas J., Luo H., Zawrah M., Miracle D. Effects of Process-Control Agents on Mechanical Alloying of Nanostructured Aluminum Alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, vol. 34, pp. 159-170. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0217-7>
7. Eze A. A., Sadiku E. R., Kupolati W. K., Snyman J., Ndambuki J. M., Jamiru T., Durowoju M. O., Ibrahim I. D., Shongwe M. B., Desai D. A. Wet ball milling of niobium by using ethanol, determination of the crystallite size and microstructures // *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, 22422. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01916-w>
8. Mursalat M., Schoenitz M., Dreizin E. L. Composite Al-Ti powders prepared by high-energy milling with different process controls agents // *Advanced Powder Technology*, 2019, V. 30, iss. 7, pp. 1319-1328. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.04.007>
9. Nazari K. A., Nouri A., Hilditch T. The addition of a surfactant at regular time intervals in the mechanical alloying process // *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 615, pp. 47-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.142>

REFERENCES

1. Suryanarayana C., Al-Joubori A. A., Wang Z. Nanostructured Materials and Nanocomposites by Mechanical Alloying: An Overview. *Metals and Materials International*, 2022, vol. 28, pp. 41-53. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-00998-5>
2. El-Eskandarany M. S., Al-Hazza A., Al-Hajji L. A., Ali N., Al-Duweesh A. A., Banyan M. and Al-Ajmi F. Mechanical Milling: A Superior Nanotechnological Tool for Fabrication of Nanocrystalline and Nanocomposite Materials. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 10, 2484. <https://doi.org/10.3390/nano11102484>
3. Michalchuk A. A., Boldyreva E. V., Belenguer A. M., Emmerling F., Boldyrev V. V. Tribochemistry, Mechanical Alloying, Mechanochemistry: What is in a Name? *Frontiers in Chemistry*, 2021, vol. 9, 685789. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.685789>
4. Kushwaha A. K., John M., Misra M. and Menezes P. L. Nanocrystalline Materials: Synthesis, Characterization, Properties, and Applications. *Crystals*, 2021, vol. 11, no. 11, 1317. <https://doi.org/10.3390/cryst11111317>
5. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 2001, vol. 46, iss. 1-2, pp. 1-184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
6. Shaw L., Villegas J., Luo H., Zawrah M., Miracle D. Effects of Process-Control Agents on Mechanical Alloying of Nanostructured Aluminum Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, vol. 34, pp. 159-170. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0217-7>
7. Eze A. A., Sadiku E. R., Kupolati W. K., Snyman J., Ndambuki J. M., Jamiru T., Durowoju M. O., Ibrahim I. D., Shongwe M. B., Desai D. A. Wet ball milling of niobium by using ethanol, determination of the crystallite size and microstructures. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, 22422. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01916-w>
8. Mursalat M., Schoenitz M., Dreizin E. L. Composite Al-Ti powders prepared by high-energy milling with different process controls agents. *Advanced Powder Technology*, 2019, V. 30, iss. 7, pp. 1319-1328. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.04.007>
9. Nazari K. A., Nouri A., Hilditch T. The addition of a surfactant at regular time intervals in the mechanical alloying process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 615, pp. 47-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.142>

10. Dreizin E. L., Schoenitz M. Mechanochemically prepared reactive and energetic materials: a review // *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, pp. 11789-11809. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0912-1>
11. Arias A. *Chemical reactions of metal powders with organic and inorganic liquids during ball milling*, Washington, NASA TN, D-8015, 1975. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750022184/downloads/19750022184.pdf>
12. Hernández J. G., Bolm C. Altering Product Selectivity by Mechanochemistry // *Journal of Organic Chemistry*, 2017, vol. 82, pp. 4007-4019. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.6b02887>
13. Yelsukov E. P., Barinov V. A., Ovetchkin L. V. Synthesis of disordering Fe₃C alloy by mechanical alloying of iron powder with liquid hydrocarbon (toluene) // *Journal of Materials Science Letters*, 1992, vol. 11, no. 10, pp. 662-663. <https://doi.org/10.1007/BF00728898>
14. Ullah M., Eaqub A. Md., Hamid S. B. A. Surfactant-assisted ball milling: a novel route to novel materials with controlled nanostructure – a review // *Reviews on Advanced Materials Science*, 2014, vol. 37, pp. 1-14. https://ipme.ru/e-journals/RAMS/no_13714/01_13714_ali.pdf
15. Dofofeev G. A., Lad'yanov V. I., Lubnin A. N., Mukhgalin V. V., Kanunnikova O. M., Mikhailova S. S., Aksenova V. V. Mechanochemical interaction of titanium powder with organic liquids // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, iss. 18, pp. 9690-9699. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.101>
16. Аксенова В. В., Канунникова О. М., Бурнышев И. Н., Ладьянов В. И. Структурно-фазовые превращения в порошках титана при механосинтезе в среде жидких углеводородов // *Журнал физической химии*, 2022, Т. 96, № 3, С. 350-356. <https://doi.org/10.31857/S0044453722030037>
17. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. Пер. с англ. В. М. Акимова, под ред. Ю. А. Пентина. М.: "Издательство иностранной литературы", 1963. 590 с.
18. Larkin P. J. *Infrared and Raman Spectroscopy: principles and spectral interpretation*. Elsevier, 2011. 230 p.
10. Dreizin E. L., Schoenitz M. Mechanochemically prepared reactive and energetic materials: a review. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, pp. 11789-11809. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0912-1>
11. Arias A. *Chemical reactions of metal powders with organic and inorganic liquids during ball milling*, Washington, NASA TN, D-8015, 1975. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750022184/downloads/19750022184.pdf>
12. Hernández J. G., Bolm C. Altering Product Selectivity by Mechanochemistry. *Journal of Organic Chemistry*, 2017, vol. 82, pp. 4007-4019. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.6b02887>
13. Yelsukov E. P., Barinov V. A., Ovetchkin L. V. Synthesis of disordering Fe₃C alloy by mechanical alloying of iron powder with liquid hydrocarbon (toluene). *Journal of Materials Science Letters*, 1992, vol. 11, no. 10, pp. 662-663. <https://doi.org/10.1007/BF00728898>
14. Ullah M., Eaqub A. Md., Hamid S. B. A. Surfactant-assisted ball milling: a novel route to novel materials with controlled nanostructure – a review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2014, vol. 37, pp. 1-14. https://ipme.ru/e-journals/RAMS/no_13714/01_13714_ali.pdf
15. Dofofeev G. A., Lad'yanov V. I., Lubnin A. N., Mukhgalin V. V., Kanunnikova O. M., Mikhailova S. S., Aksenova V. V. Mechanochemical interaction of titanium powder with organic liquids. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, iss. 18, pp. 9690-9699. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.101>
16. Aksenova V. V., Kanunnikova O. M., Burnyshev I. N., Lad'yanov V. I. Structural Phase Transformations in Titanium Powders during Mechanochemical Synthesis in Liquid Hydrocarbons. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2022, vol. 96, no. 3, pp. 495-501. <https://doi.org/10.1134/S0036024422030037>
17. Bellamy L. J. *The Infra-red Spectra of Complex Molecules*. London: Methuen & Company, 1962, 425 p.
18. Larkin P. J. *Infrared and Raman Spectroscopy: principles and spectral interpretation*. Elsevier, 2011. 230 p.

Поступила 19.04.2023; после доработки 07.06.2023; принята к опубликованию 08.06.2023
Received April 19, 2023; received in revised form June 7, 2023; accepted June 8, 2023

Информация об авторах

Аксенова Валерия Викторовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: aksenova@udman.ru

Ольга Михайловна Канунникова, доктор физико-математических наук, профессор, Удмуртский аграрный университет, Ижевск, Российская Федерация

Иван Николаевич Бурнышев, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация

Владимир Иванович Ладьянов, доктор физико-математических наук, руководитель НЦ МФМ, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация

Information about the authors

Valeriya V. Aksenova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: aksenova@udman.ru

Olga M. Kanunnikova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russian Federation

Ivan N. Burnyshev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Vladimir I. Lad'yanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation