

**Г. Ф. Ловшенко**

*Белорусская государственная академия авиации, Минск, Беларусь*

## **НАНОСТРУКТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫЕ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ**

**Аннотация.** Развитие современных отраслей промышленности требует создания новых материалов, обладающих наряду со специальными свойствами высокой прочностью и жаропрочностью. Наиболее сложным является обеспечение последней. Для ее повышения необходимо уменьшить до предельно допустимого значения величину свободного перемещения дислокаций, локализовать передвижение дефектов кристаллического строения в пределах зерна (субзерна), минимизировать сток дефектов кристаллического строения на границы зерен, исключить межзеренное скольжение, что может быть успешно реализовано в дисперсно-упрочненных материалах. Для их получения перспективной является технология, основанная на реакционном механическом легировании.

В статье представлены результаты работы автора, позволившие установить закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных дисперсно-упрочненных материалов на основе металлов, являющихся базисом для производства основных конструкционных сплавов из алюминия, меди, железа и никеля. Эти сплавы используются при производстве изделий, работающих в жестких температурно-силовых условиях – при температурах, достигающих  $0,85T_{пл}$  основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов. На базе их создана новая область материаловедения конструкционных материалов – наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов. Наиболее перспективными направлениями применения технологий, основанных на реакционном механическом легировании, в области материаловедения являются: 1) высокопрочные материалы для деталей машин, инструментальной оснастки и изделий различного функционального назначения, работающих в жестких температурно-силовых условиях; 2) порошки для газотермического напыления и покрытия из них; 3) нанокристаллические модифицирующие лигатуры и модификаторы. Приведены результаты промышленного внедрения

**Ключевые слова:** механическое легирование, теория, технология, структурные и фазовые превращения, дисперсное упрочнение, наноструктурные материалы, состав, структура, свойства

**Для цитирования.** Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 34–42.

**G. F. Lovshenko**

*Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Belarus*

## **NANOSTRUCTURAL MECHANICALLY ALLOYED DISPERSION STRENGTHENED MATERIALS BASED ON METALS**

**Abstract.** Development of modern industries requires creation of new materials, which have, along with special properties, high strength and heat resistance. The most difficult is the provision of the latter. To increase it, it is necessary to reduce the amount of free movement of dislocations to a maximum permissible value, localize movement of defects of the crystal structure within the grain (subgrain), minimize the runoff of defects of the crystal structure at grain boundaries, exclude intergranular sliding, which can be successfully realized in dispersion-hardened materials. To obtain them, a promising technology is based on the reaction mechanical alloying. The article presents the results of the author's work, which made it possible to establish the regularities in the formation of phase composition, structure and properties at all stages of obtaining mechanically alloyed dispersed-hardened materials based on metals, which are the basis for the production of basic structural alloys-aluminum, copper, iron and nickel. These alloys are used for products operating under severe temperature-strength conditions – at temperatures reaching  $0.85T_{ml}$  of the substrate. They have tensile strength 1.2–1.5 times higher than that of analogues, and on their basis a new area of materials science of structural materials was created – nanostructured mechanically alloyed dispersed-hardened materials based on metals. The most promising areas of application of technologies based on reaction mechanical alloying in the field of materials science are: 1) high-strength materials for machine parts, tooling and products of various functional purposes operating under severe temperature and force conditions; 2) powders for gas-thermal spraying and coating of them; 3) nanocrystalline modifying ligatures and modifiers. The results of industrial introduction are given – two small-scale enterprises for the production of import-substituting science-intensive products were created.

**Keywords:** mechanical alloying, theory, technology, structural and phase transformations, dispersion strengthening, nanostructural materials, compound, structure, properties

**For citation.** Lovshenko G. F. Nanostructural mechanically alloyed dispersion strengthened materials based on metals. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 34–42 (in Russian).

**Введение.** Развитие современных отраслей промышленности, включающих как общее машиностроение, так и моторо-, турбино-, авиа-, приборостроение, ядерную энергетику и др., требует создания новых материалов, обладающих не только специальными свойствами, но и высокой прочностью и жаропрочностью. Наиболее сложным в создании необходимого комплекса свойств является обеспечение жаропрочности. Максимальная температура эксплуатации классических (литых) жаропрочных сплавов не превышает  $0,6T_{пл}$  основы, что обусловлено ростом и растворением упрочняющих фаз интерметаллидов и развитием межзеренного скольжения и диффузии. Для исключения этих негативных явлений необходимо уменьшить до предельно допустимого значения величину свободного перемещения дислокаций, локализовать передвижение дефектов кристаллического строения в пределах зерна (субзерна), минимизировать сток дефектов кристаллического строения на границы зерен, исключить межзеренное скольжение. Эти условия могут быть реализованы в дисперсно-упрочненных материалах, представляющих собой матрицу из металла (сплава), в которой равномерно распределены дисперсные частицы упрочняющей фазы, стойкой против коагуляции и роста при температурах, превышающих  $0,95T_{пл}$  основы.

Для эффективного повышения прочности как при низких, так и при высоких температурах материалы должны иметь фрагментированную структуру с максимально развитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированную наноразмерными включениями упрочняющих фаз. Наиболее перспективной будет структура, близкая к агрегатному типу. Она может быть получена при реализации технологии, основанной на реакционном механическом легировании, которое заключается в обработке в энергонапряженной мельнице-механореакторе шихты. В процессе обработки происходит механически активируемое взаимодействие между компонентами, вызывающее образование упрочняющих фаз. По общепринятой классификации, основанной на физических свойствах частиц, материалы относятся к наноструктурным.

В данной статье представлены результаты работы автора [1–6] по установлению закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных материалов и созданию на их основе новой области материаловедения конструкционных материалов, работающих при температурах, достигающих  $0,85T_{пл}$  основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов, – наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов, а также показаны перспективные области их применения.

Результаты получены в научной школе профессора Ф. Г. Ловшенко (Белорусско-Российский университет, г. Могилев), воспитанником которой является автор данной работы. Школа была создана по инициативе академика НАН Беларуси О. В. Романа, большой вклад в становление и развитие ее внесли научные учреждения НАН Беларуси: Физико-технический институт, Институт порошковой металлургии, Институт технологии металлов, а также лично академики НАН Беларуси П. А. Витязь, С. А. Астапчик, А. И. Гордиенко, В. В. Клубович и Е. И. Марукович.

**Методика исследования, материалы и оборудование.** Реакционное механическое легирование, являющееся разновидностью механического легирования, заключается в обработке в энергонапряженной мельнице-механореакторе шихты, состоящей из порошков матричного металла либо сплава и компонентов, способных реагировать с основой или между собой с образованием упрочняющих фаз. В качестве исходных компонентов используются стандартные порошки металлов и соединений. Методика выбора исходного состава шихты базируется на предположении, что специальные свойства материалов (электрическое сопротивление, плотность, коррозионная стойкость и др.) могут быть получены введением элементов, традиционно применяющихся в классическом материаловедении, а высокие прочность и жаропрочность – комплексным легированием элементом, обладающим высоким сродством к O, S или N, с одной стороны, и соединением, содержащим O, S или N, – с другой. При этом во втором случае в процессе реализации технологии имеет место взаимодействие между легирующими компонентами, приводящее к образованию термодинамически стабильных упрочняющих фаз.

Существенным отличием технологии, основанной на реакционном механическом легировании, от традиционной (литье) является то, что исходная шихта и конечный продукт имеют близкий химический состав.

Основные этапы изготовления материалов по данной технологии следующие: выбор исходных компонентов и прогнозирование фазового состава материалов; обработка шихты в механореакторе – получение наноструктурной дисперсно-упрочненной гранулированной композиции; холодное прессование гранулированной композиции; отжиг холоднопрессованных брикетов; получение компактного полуфабриката деформационно-термической обработкой брикета. Наиболее важным этапом является реакционное механическое легирование, базирующееся на положениях механохимии. Согласно им механическая энергия, так же как и тепловая, при определенных условиях активирует структурные и фазовые превращения, получившие название «механохимические». Механически активируемые процессы, протекающие на этой стадии, формируют фазовый состав и структуру композиций, в значительной мере наследуемых материалом на последующих этапах их переработки в полуфабрикаты.

Эффективными аппаратами для промышленного синтеза дисперсно-упрочненных металлических композиций являются энергонагруженные вибромельницы инерционного типа, производительность которых в 1,3–1,6 раза выше, затраты энергии на единицу продукции в 1,4–1,7 раза ниже, а надежность и долговечность в 3–5 раз выше, чем у традиционно применяемых атриторов.

Проведенные автором настоящей статьи теоретические и экспериментальные исследования носят фундаментальный характер и выполнены с применением методик, приборов и оборудования, которые используются в современном материаловедении.

**Результаты исследования.** Формирование гранулированной композиции в общем случае описывается следующей схемой. При обработке порошковой шихты в механореакторе параллельно протекают процессы накопления дефектов кристаллического строения, вызывающего разрушение частиц, и последующая сварка осколков. Сварке предшествуют адгезия и агломерация. Последняя вызвана в основном ван-дер-ваальсовыми и электростатическими силами и получает развитие прежде всего в местах контакта свежих поверхностей. Ударное воздействие на агломерированную частицу вызывает холодную сварку, сопровождающуюся диффузией. В результате многократно повторяющихся разрушения и сварки формируется гранулированная композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой. На начальном этапе обработки, как правило, превалирует разрушение, в последующем – процессы агломерации и сварки, вследствие протекания которых средний размер гранул непрерывно увеличивается. На определенном этапе между процессами разрушения и сварки устанавливается динамическое равновесие, в результате которого средний размер гранул стабилизируется. Продуктом механического легирования является гранулированная композиция со средним размером гранул 25–500 мкм (рис. 1), зависящим от природы матричного металла и состава сплава с гомотенным и равномерным распределением легирующих элементов (рис. 2).

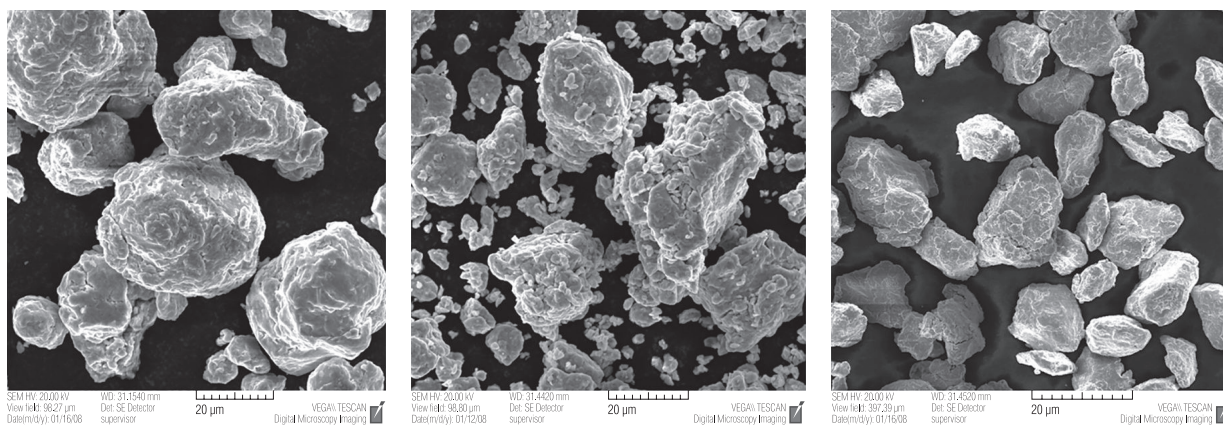


Рис. 1. Форма и размер механически легированных гранул  
Fig. 1. The shape and size of mechanically doped granules

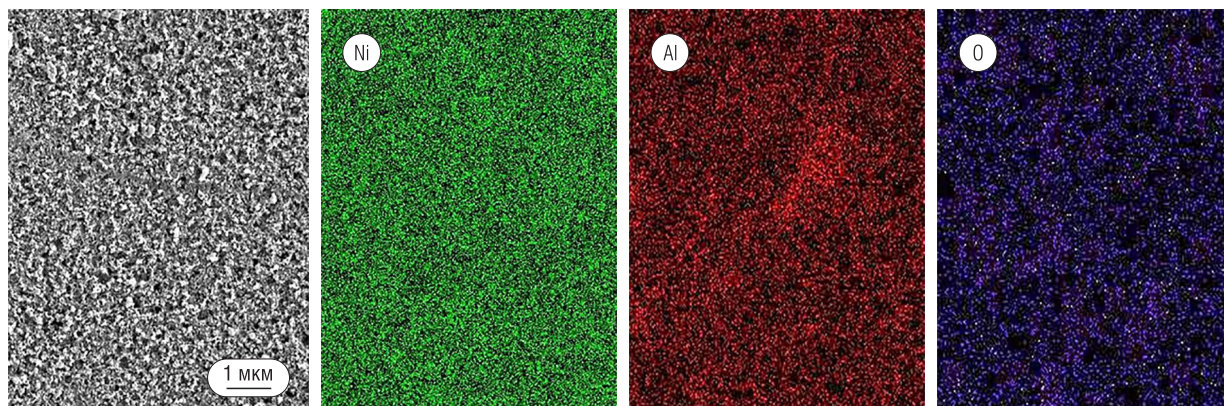


Рис. 2. Микроструктура и распределение элементов в гранулированной композиции «Ni–Al (3 %)»

Fig. 2. Microstructure and distribution of elements in a granular composition “Ni–Al (3 %)”

При реакционном механическом легировании получают развитие только фазовые превращения, уменьшающие свободную энергию системы и вызывающие образование твердых растворов и соединений. Для моделирования конечного фазового состава материалов приемлем термодинамический анализ равновесных процессов. Скорость и полнота протекания однотипных реакций возрастают с уменьшением значения энергии Гиббса взаимодействия между компонентами. Однако фазовый состав механически легированных композиций, как правило, является неравновесным.

Инициирование и протекание механически активируемых превращений происходит по двум механизмам: первый (изотермический) обусловлен неравновесной деформационно-ускоренной диффузией, протекающей при лобовом ударе; второй (тепловой) имеет место при скользящем ударе и вызывает повышение температуры до значений, превышающих 1000 °С.

Для получения дисперсно-упрочненных материалов перспективными являются комплексно-легированные композиции системы «основа – соединение, содержащее O, C, N в комплексе или в отдельности, – элемент, имеющий высокое сродство к O, C, N». В качестве второго компонента эффективно использование ряда оксидов, карбонатов, нитратов, органических соединений, обладающих низкой термодинамической стабильностью. В этих системах имеет место механически активируемое взаимодействие, вызывающее образование термодинамически стабильных оксидов, карбидов, нитридов, интерметаллидов. В комплексно-легированных композициях для достаточно полного протекания механически активируемого взаимодействия между легирующими компонентами по меньшей мере один из них должен обладать достаточно высокой растворимостью в основе.

Независимо от типа системы механически легированные композиции являются наноструктурными термодинамически неравновесными дисперсно-упрочненными материалами, структура основы которых формируется по механизму динамической рекристаллизации, включающему этапы: накопление дислокаций до максимально возможной плотности ( $\rho \geq 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), их перестройку и образование фрагментированной субструктуры, превращение фрагментов в кристаллиты. Структура основы представляет собой неомогенный твердый раствор и относится к субмикроструктурному типу с размером зерен  $\leq 100 \text{ нм}$ , разделенных на блоки  $\leq 50 \text{ нм}$ ; плотностью дислокаций  $10^{10}–10^{11} \text{ см}^{-2}$ , расположенных по границам зерен и субзерен, стабилизированных наноразмерными включениями ( $d < 5 \text{ нм}$ ) механически синтезированных соединений, представляющих собой квазикластеры и находящиеся, как правило, в рентгеноаморфном состоянии.

Стабилизация фазового состава, структуры и свойств и дегазация механически легированных композиций происходит при отжиге, который может быть совмещен с термомеханической обработкой. Механически легированные композиции находятся в наклепанном, предельно упрочненном состоянии, и оптимальной технологией переработки их в компактный материал является горячее прессование с большой степенью пластической деформации – экструзия. Основными задачами этого процесса являются: получение полуфабрикатов с плотностью, близкой к теоретической, необходимого сечения и размеров, а также формирование устойчивой дислокационной субструктуры, стабилизированной дисперсными включениями упрочняющей фазы, обеспечивающей высокую жаропрочность материала.

Термическое воздействие на механически легированные композиции сопровождается термодинамически разрешенными превращениями, приближающими фазовый состав к равновесному. Основными из них являются: рост зерен основы, уменьшение градиента концентрации твердого раствора при переходе от одного зерна к другому, кристаллизация механически синтезированных аморфных фаз, взаимодействие между сохранившимися компонентами или промежуточными продуктами их механохимических превращений и др. Кинетику протекания термически активируемых превращений определяют особенности строения механически легированных композиций, основными из которых являются: активированное состояние реагирующих компонентов, вызванное их высокой дисперсностью и дефектностью кристаллического строения; большая суммарная площадь поверхности частиц реагирующих веществ; наличие непосредственного контакта между реагентами, обусловленного ювенильным состоянием их поверхностей; короткие (несколько десятков атомных параметров) диффузионные пути атомов реагентов. Данные факторы создают условия для протекания превращений по кинетике, близкой к бездиффузионной. Этому также способствует высокоразвитая поверхность границ зерен и субзерен, блокированная наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз, которая является препятствием (барьером) для межкристаллитной диффузии, в результате чего она получает развитие в пределах зерна (блока). Наличие диффузионного барьера в виде границ зерен и субзерен обуславливает существенную разницу в фазовом составе и строении соседних зерен. Это явление определяет также высокую термическую стабильность фаз, не имеющих когерентной связи с основой, в том числе и включений исходных компонентов.

Материалы, полученные по оптимальной технологии, независимо от природы матричного металла имеют микрокристаллический тип структуры основы (рис. 3), стабилизированной наноразмерными включениями упрочняющих фаз, и относятся к наноструктурным дисперсно-упро-

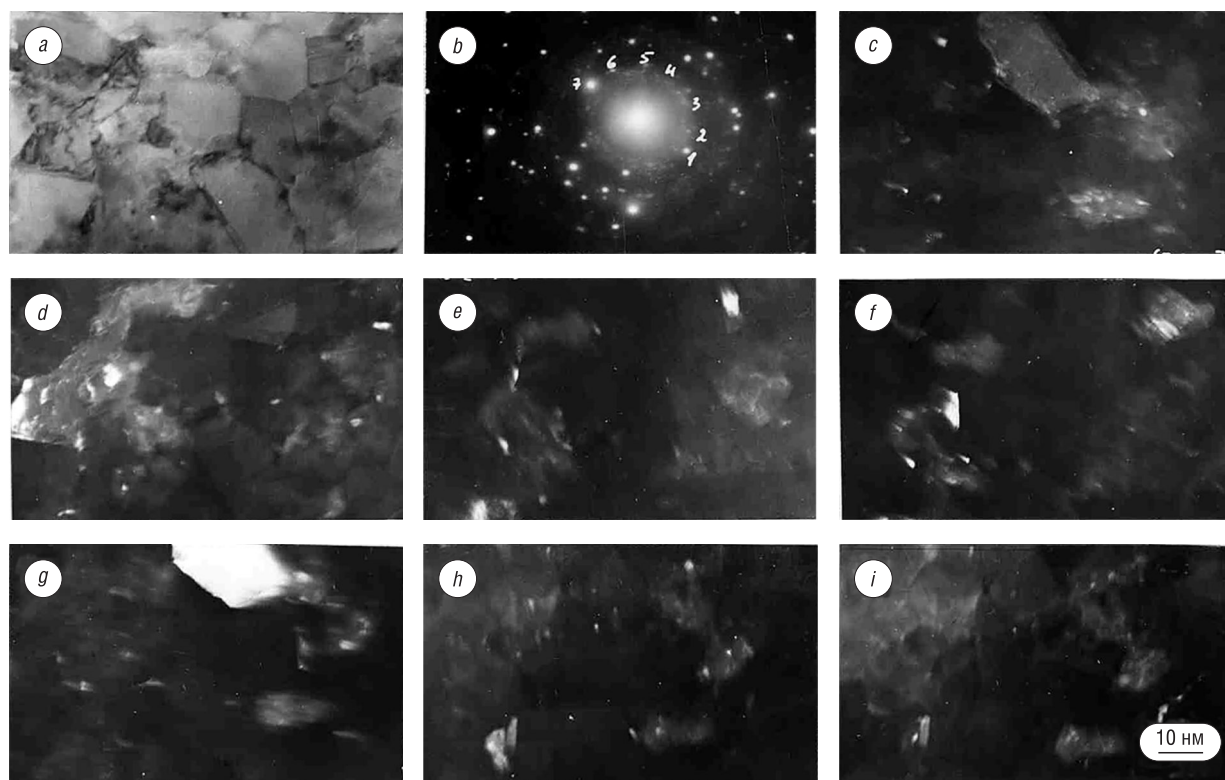


Рис. 3. Микроструктура сплава, полученного из композиции «Al–CuO (6,26 %)»: *a* – светлое поле; *b* – микроэлектроннограмма. ПЭМ; *c–i* – темное поле в рефлексах фаз: Al +  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*c*); Al + Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> +  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*d*);  $\gamma'$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*e*); Al + Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> (*f*); Al +  $\chi$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*g*); Al + Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> (*h*); AlN (*i*)

Fig. 3. The microstructure of the alloy obtained from the composition “Al–CuO (6.26 %)”: *a* – bright field; *b* – microelectronogram. TEM; *c–i* – dark field in phase reflexes: Al +  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*c*); Al + Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> +  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*d*);  $\gamma'$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*e*); Al + Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> (*f*); Al +  $\chi$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*g*); Al + Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> (*h*); AlN (*i*)

ченными материалами. Структура характеризуется следующими параметрами: размер зерен  $\leq 500$  нм, размер блоков  $\leq 100$  нм, плотность дислокаций  $10^9$ – $10^{10}$  см $^{-2}$ , размер термодинамически стабильных включений оксидов  $\leq 20$  нм, карбидов, нитридов, интерметаллидов –  $\leq 100$  нм.

Длительное термическое воздействие при температурах до  $0,85T_{пл}$  основы материалов не обеспечивает достижения фазового равновесия. Фазовый состав материалов отличается от равновесного наличием зерен и групп зерен основы с разной концентрацией легирующих компонентов в твердом растворе и неравновесных соединений, а также отдельных включений ( $d \leq 0,1$  мкм) исходных компонентов. Это обусловлено блокировкой наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз границ зерен и субзерен, являющихся препятствием (барьером) для межкристаллитной диффузии. Структура и фазовый состав материалов, полученных по технологии, основанной на механическом легировании, характеризуется высокой стойкостью против длительного термического воздействия при температурах, достигающих  $0,85T_{пл}$  основы (рис. 4).

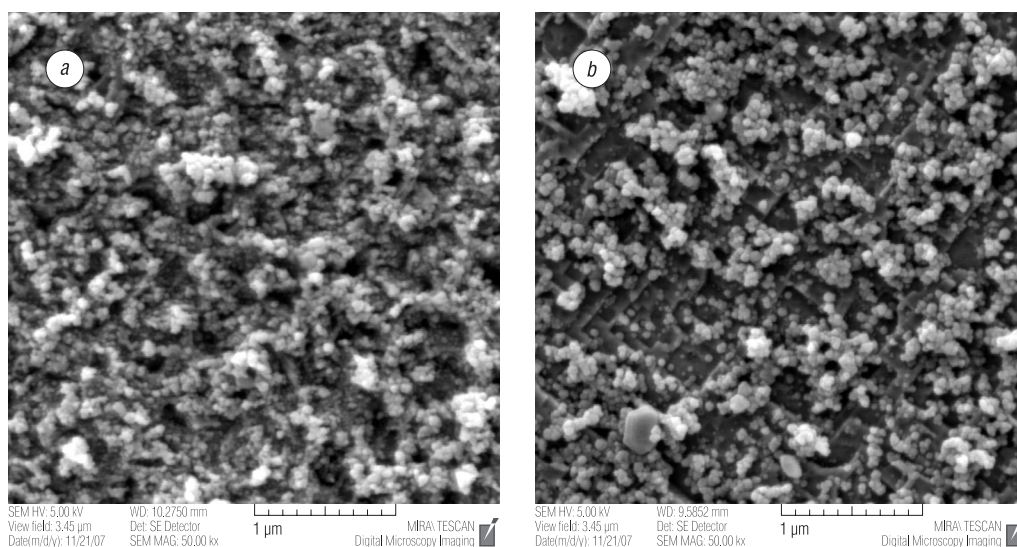


Рис. 4. Структура компактного материала, полученного из композиции «Ni – Al (3 %)»: *a* – исходная, *b* – после отжига при 1200 °C в течение 5 ч. СЭМ

Fig. 4. The structure of a compact material obtained from the composition “Ni – Al (3 %)”, *a* – initial, *b* – after annealing at 1200 °C for 5 hours. SEM

Основное упрочнение механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных материалов обусловлено наличием высокоразвитой поверхности границ зерен и субзерен, стабилизированной наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз, имеющих высокое значение модуля сдвига. Зернограничному упрочнению сопутствует «внутризеренное» дисперсное и в большинстве случаев дисперсионное.

Технология, основанная на реакционном механическом легировании, обеспечивает получение наноструктурных дисперсно-упрочненных алюминиевых, медных, железных и никелевых материалов различного функционального назначения, в том числе и со специальными свойствами, по прочности и жаропрочности в 1,2–1,5 раза превосходящих аналоги.

**Практическое применение результатов работы.** Установлены универсальные закономерности, зависимости и механизмы протекания механически и термически активируемых фазово-структурных превращений на всех технологических этапах получения механически легированных материалов из порошковых композиций систем «основной металл – легирующий металл», «основной металл – легирующий оксид – легирующий металл» на основе широко применяемых в машиностроении металлов – Fe, Ni, Al и Cu. Эти закономерности являются научной базой для разработки технологических процессов получения материалов с требуемым комплексом физико-механических свойств и создания инновационного мелко- и среднесерийного производства механически легированных дисперсно-упрочненных материалов различного функционального назначения и изделий из них.

Наиболее перспективными в области материаловедения направлениями применения технологий, основанных на реакционном механическом легировании, являются: 1) высокопрочные материалы для деталей машин, инструментальной оснастки и изделий различного функционального назначения, работающих в жестких температурно-силовых условиях; 2) порошки для газотермического напыления и покрытия из них; 3) нанокристаллические модифицирующие лигатуры и модификаторы.

Оптимизированы состав и технологические условия получения ряда **жаропрочных материалов** ( $t_{\text{нач. рекр.}} \geq 0,7T_{\text{пл}}$  основы) различного назначения на основе Al, Cu, Fe и Ni.

**Алюминиевые материалы** (лабораторная технология): высокопрочные ( $\sigma_B \geq 750$  МПа,  $\sigma_B^{500} \geq 220$  МПа); с низким значением коэффициента линейного расширения ( $\alpha = (17-18) \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$  и  $\sigma_B \geq 500$  МПа, а  $\sigma_B^{300} \geq 230$  МПа); низкой плотности ( $\rho \leq 2,4$  г/см $^3$  и  $\sigma_B \geq 600$  МПа); с содержанием до 40 % бора (эффективное сечение захвата тепловых нейтронов до 290 барн и  $\sigma_B \geq 350$  МПа); антифрикционные на основе Al–Pb ( $\sigma_B \geq 380$  МПа).

**Медные материалы электротехнического назначения и изделия из них** (среднесерийное производство): электропроводность 0,7–0,8 % от электропроводности меди,  $t_{\text{нач. рекр.}} \geq 750$  °C, 200–270 НВ,  $\sigma_B = 750-950$  МПа.

**Стали** (лабораторная технология) с  $t_{\text{нач. рекр.}} \geq 750-950$  °C, по твердости в 1,5–2,7 и пределу прочности в 1,4–2,2 раза превышающие аналоги, например 15X11MФ (54 HRC,  $\sigma_B = 1380-1410$  МПа), 15X18H9 (46 HRC,  $\sigma_B = 1120-1140$  МПа).

**Никелевые сплавы** (лабораторная технология) с  $t_{\text{нач. рекр.}} \geq 1000-1050$  °C, по прочности в интервале температур 20–900 °C в 1,3–1,7 раза превосходят аналоги (литые дисперсионно-упрочненные сплавы ХН77ТЮ и ХН70ВМТЮ); по основным показателям не уступают, а в ряде случаев превосходят дисперсно-упрочненные материалы ВДУ-1, ВДУ-2, ТД-никель и DS-никель, ТД-нихром, изготовленные из дисперсных порошков, полученных химическими методами.

**Порошки для газотермического напыления и покрытия из них** (промышленная технология, среднесерийное производство). Оптимизированные составы шихты по базовым элементам механически легированные композиционные порошки на основе железа примерно соответствовали сталям X, X3, X6, X9, 20X2H4, 20X18H10T, а также железоалюминиевому сплаву (30 % Al); на основе никеля – сплавам ПН95Ю5, ПН85Ю15, ПХ20Н80, ПХ20Н75Ю5.

Покрытия на основе металлов наследуют субмикрокристаллический тип структуры основы композиционных порошков и имеют комплексное упрочнение, сочетающее твердорастворное, зернограничное, дисперсионное и дисперсное и определяющее их высокую износостойкость и жаропрочность в широком интервале температур, верхнее значение которых превышает  $0,7T_{\text{пл}}$  основы. По прочности сцепления с основой, твердости и износостойкости в условиях трения скольжения с ограниченной смазкой плазменные покрытия из механически легированных порошков в 1,3–1,7 раза превосходят аналоги.

Созданные композиционные металлокерамические порошки относятся к системе  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--Ni--Al}$ . Отличительной особенностью покрытий из разработанных порошков является наличие стабилизированных наноразмерными включениями  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  прослоек никеля, окаймляющих зерна оксидов, что повышает вязкость и устраняет основной недостаток материалов на основе керамики – высокую хрупкость, вызывающую разрушение покрытия в процессе эксплуатации.

**Нанокристаллические модифицирующие лигатуры и модификаторы** (промышленная технология, среднесерийное производство). Для производства бронз применялась механически легированная лигатура систем Cu–Cr–C–O и Cu–Cr–Zr–C–O, полученная по оптимальной технологии в виде горячепрессованных прутков и имеющая медную основу суб-, /микрокристаллического типа ( $d_{\text{зерна}} \leq 1$  мкм) с глобулярными включениями хрома размером менее 0,5 мкм, а также синтезированных нанокристаллов, представляющих собой оксиды  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , карбиды  $\text{ZrC}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , интерметаллид  $\text{Cu}_3\text{Zr}$  и выполняющих роль основных модификаторов, вызывающих после полного цикла обработки полуфабрикатов уменьшение зерна основы разработанных материалов по сравнению с базовыми в 15–25 раз (рис. 5).

Применение механически легированных модифицирующих лигатур, изготовление которых осуществляется на недорогом оборудовании и отличается простотой, экологической безопасностью и универсальностью, позволяет:

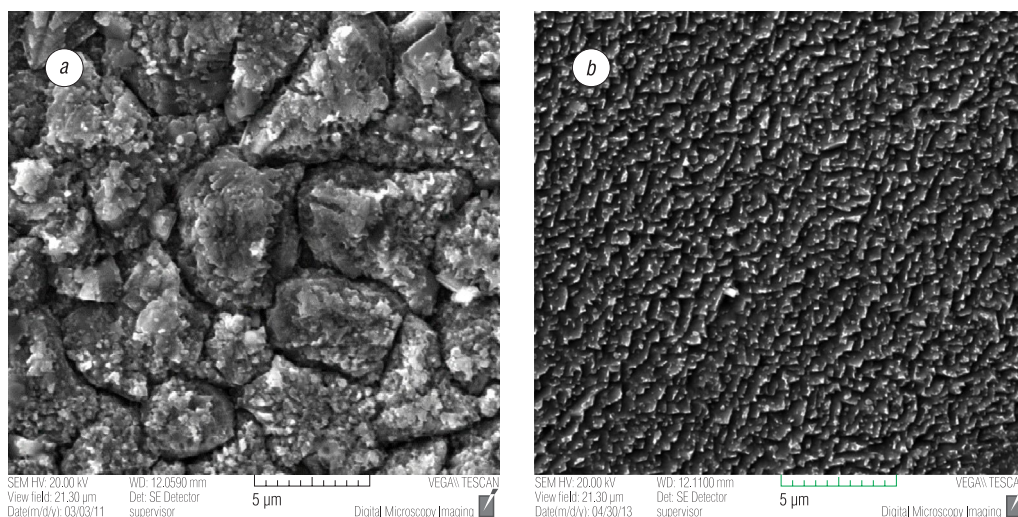


Рис. 5. Структура бронзы БрХ: *a* – классическая, *b* – экспериментальная

Fig. 5. Structure of cast bronze BrX: *a* – classical, *b* – experimental

исключить из технологии получения хромовых бронз высокотемпературный, требующий специального дорогостоящего печного оборудования, экологически опасный процесс изготовления литых лигатур, а также холодную пластическую деформацию отливок и полученных из них полуфабрикатов;

снизить на 50–100 °С оптимальную температуру процесса легирования расплава меди и уменьшить в 2,5–3,5 раза его продолжительность, а также исключить из технологии холодную пластическую деформацию (со степенью 60 %) закаленных полуфабрикатов, что существенно упрощает и удешевляет процесс получения хромовых бронз, расширяет область их применения.

Бронзы, выплавленные с применением механически легированных лигатур по разработанной технологии и подвергнутые оптимальной термической обработке, имеют медную основу субмикроструктурного типа ( $d_{\text{зерна}} = 0,1\text{--}0,2$  мкм) с включениями нанокристаллов хрома, а также оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  и карбидов  $\text{ZrC}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . В отличие от дисперсионно упрочненных базовых бронз для разработанных характерно комплексное упрочнение, сочетающее зернограничное, дисперсионное и дисперсное. Это приводит к повышению их физико-механических свойств: твердости – на 20 %, предела прочности при растяжении – на 5 %, электропроводности – на 20 % и температуры начала рекристаллизации – на 10 %, что обеспечивает увеличение стойкости изделий в 1,8–2,2 раза.

Применение механически легированных наноструктурных модифицирующих лигатур приводит к измельчению структуры и повышению физико-механических свойств литых серых чугунов. Так, модифицирование чугуна сплавом, полученным из механически синтезированной композиции «алюминий – углерод (6 %)», приводит к уменьшению длины и увеличению толщины графитовых включений. Причем по сравнению с модифицированием алюминием количество эвтектических ячеек в единице поверхности в этом случае повышается в 1,65 раза, что оказывает существенное влияние на механические свойства материала.

Созданные технологии получения материалов и изделия из них могут быть использованы на предприятиях металлургического и машиностроительного профилей.

Результаты работы широко представлялись на престижных международных выставках и форумах как в ближнем, так и дальнем зарубежье (США, Южная Корея, Китай, Германия, Румыния, Россия, Украина и др.), отмечены многочисленными дипломами и награждены пятью серебряными и двумя золотыми медалями.

Для промышленного внедрения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на базе Белорусско-Российского университета (Могилев, Беларусь) создано два малотоннажных предприятия по выпуску импортозамещающей наукоемкой продукции. Результаты исследований представлены в многочисленных научных публикациях и учебно-методических разработках.



**Заключение.** На основе установленных закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных алюминиевых, медных, железных и никелевых материалов создана новая область материаловедения конструкционных материалов для работы при температурах, достигающих  $0,85T_{пл}$  основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов, – наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов.

#### Список использованных источников

1. Витязь, П. А. Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск: Беларус. наука, 1998. – 352 с.
2. Ловшенко, Г. Ф. Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2005. – 276 с.
3. Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.
4. Ловшенко, Ф. Г. Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск: БНТУ, 2012. – 297 с.
5. Ловшенко, Ф. Г. Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2013. – 215 с.
6. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных материалов / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2016. – 420 с.

#### References

1. Vityaz P. A., Lovshenko F.G., Lovshenko G.F. *The mechanically alloyed aluminum-based alloys and copper*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 1998. 352 p. (in Russian).
2. Lovshenko G. F., Lovshenko F.G. *Theoretical and technological aspects of nanostructured mechanically alloyed materials metals-based*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2005. 276 p. (in Russian).
3. Lovshenko G. F., Lovshenko F. G., Khina B.B. *Nanostructured mechanically alloyed materials based on metals*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2008. 679 p. (in Russian).
4. Lovshenko F. G., Lovshenko G.F. *Nanostructured materials are mechanically alloyed nickel-based*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2012. 297 p. (in Russian).
5. Lovshenko F. G., Lovshenko G.F. *Composite nanostructure mechanically alloyed powders for thermal coatings*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2013. 215 p. (in Russian).
6. Lovshenko F. G., Lovshenko G.F. *Laws of formation of structure and size distribution of mechanically alloyed materials*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2016. 420 p. (in Russian).

#### Информация об авторе

Ловшенко Григорий Федорович – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии авиации (ул. Уборевича, 77, 220096, Минск, Республика Беларусь). E-mail: greg-lovshenko@mail.ru

#### Information about the author

Gregory F. Lovshenko – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector of the Belarusian State Academy of Aviation (77, Ubovovich Str., 220096, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: greg-lovshenko@mail.ru