

УДК 621.762:669.71

Г. Ф. Ловшенко, канд. техн. наук, доц., З. М. Ловшенко, канд. техн. наук, доц.,  
А. И. Хабибуллин

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ РЕАКЦИОННОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Проведен анализ аппаратов различных конструкций, применяемых для диспергирования твердых тел, различающихся видом механического воздействия на вещество. Теоретически обосновано и экспериментально проверено оборудование, обеспечивающее реализацию реакционного механического легирования для получения наноструктурных высокостойких композиционных материалов на основе металлов. Приведены расчеты, подтверждающие работоспособность конструкции, и техническая характеристика конструкции.

Прогресс в области производства высокостойких дисперсно-упрочненных материалов различного функционального назначения обеспечивает технология, основанная на реакционном механическом легировании [1]. Основным компонентом для осуществления процесса являются порошки.

Реакционное механическое легирование базируется на основных положениях механохимии, согласно которым в результате механического воздействия в локальных микрообъемах твердого тела возникают внутренние напряжения. Основными путями их релаксации являются: выделение тепла; зарождение, размножение и миграция дефектов кристаллического строения; образование новой поверхности; возбуждение химической реакции. Преимущественное направление релаксации зависит как от свойств веществ, так и от условий нагружения. При увеличении мощности механического воздействия происходит постепенный переход от релаксации по тепловому каналу к каналам, связанным с накоплением дефектов кристаллического строения, разрушением и химическим взаимодействием. Сложность процессов, протекающих при механическом воздействии на многокомпонентные композиции, не позволяет до настоящего времени разработать общую теорию механохимических превращений. Существующие модели являются качественными, каждая отражает одну из сторон процесса

(не исключая, а взаимно дополняя друг друга) и имеют ряд общих черт.

Процесс переноса компонентов при механическом легировании, определяющий скорость механохимических превращений, является сложным. Согласно качественным представлениям при обработке твердофазных композиций в механореакторе, с одной стороны, происходит образование *свежей поверхности* и создаются условия для взаимодействия между компонентами по бездиффузионной кинетике, а с другой стороны, имеет место деформационное и диффузионное перемещение компонентов, вызывающие перемешивание на кластерном и молекулярном уровнях соответственно.

Внешней стороной, отражающей сложные физико-химические процессы, протекающие при механическом легировании, является изменение морфологии и размера частиц обрабатываемой композиции. При обработке в механореакторе параллельно протекают процессы разрушения частиц и образования из осколков в результате адгезии, агломерации и сварки гранулированной композиции. На начальном этапе преобладает первый процесс, в дальнейшем – второй, сменяющийся динамическим равновесием.

Реакционное механическое легирование осуществляется в мельницах-механореакторах, под которыми пони-

маются энергонапряженные аппараты, обеспечивающие протекание механохимических превращений. Для их реализации требуется высокая плотность энергии в рабочем пространстве аппарата. Высокая энергонапряженность является одним из важных факторов, обеспечивающим реализацию процесса реакционного механического легирования.

К настоящему времени разработано большое количество конструкций аппаратов для диспергирования. По виду преимущественного нагружения выделены три типа мельниц [2]:

1) с низкой скоростью нагружения, преимущественно сжатием (шаровые, шарокольцевые, стержневые, бегуны, центробежные и т. д.);

2) со средней скоростью нагружения, разрушающие, в основном, стесненным ударом (вибрационные, центробежно-планетарные, магнитно-вихревые и т. д.);

3) с высокой скоростью нагружения, измельчающие материалы преимущественно свободным ударом (ударно-отражательного действия, ударные мельницы, дезинтеграторы и дисмембраторы, молотковые, струйные, роторные и т. д.).

Реакционное механическое легирование может быть, в принципе, реализовано в аппаратах со средней и высокой скоростью нагружения: атриторах, вибрационных, центробежно-планетарных, ударно-отражательных, роторно-центробежных и др. Однако высокопроизводительные, надежные, долговечные и экономичные промышленные механореакторы для металлических композиций до настоящего времени отсутствуют, что является основным препятствием применения технологии, основанной на реакционном механическом легировании, для получения высокостойких конструкционных материалов различного функционального назначения, включая дисперсно-упрочненные.

К **недостаткам** центробежно-планетарных, ударно-отражательных, роторно-центробежных мельниц относят небольшую емкость помольных камер, высокую интенсивность износа мелющих тел и сте-

нок барабанов, значительный намол железа в обрабатываемой композиции, что не позволяет использовать их для механического легирования в качестве промышленного оборудования. Из вышеприведенного ряда аппаратов для диспергирования, в наибольшей мере отвечающим перечисленным требованиям, в качестве механореакторов промышленного типа представляют интерес атриторы и вибрационные мельницы.

Основным аппаратом для механического легирования до настоящего времени является **атритор** [2], недостатками которого являются [1]:

1) относительно низкая энергонапряженность, не обеспечивающая необходимую скорость протекания механохимических превращений, что исключает возможность его применения для реакционного механического легирования разбавленных систем на основе металлов (медь, железо, никель, титан);

2) недостаточная надежность и долговечность;

3) интенсивный износ лопастей-импеллеров и рабочих тел, приводящий к намолу железа;

4) низкая производительность и высокая энергоемкость.

Этих недостатков, за исключением первого, лишен механореактор вибрационного типа [1].

В связи с этим, **целью данной работы** является разработка конструкции надежного и долговечного высокоэнергетического промышленного механореактора вибрационного типа для осуществления реакционного механического легирования.

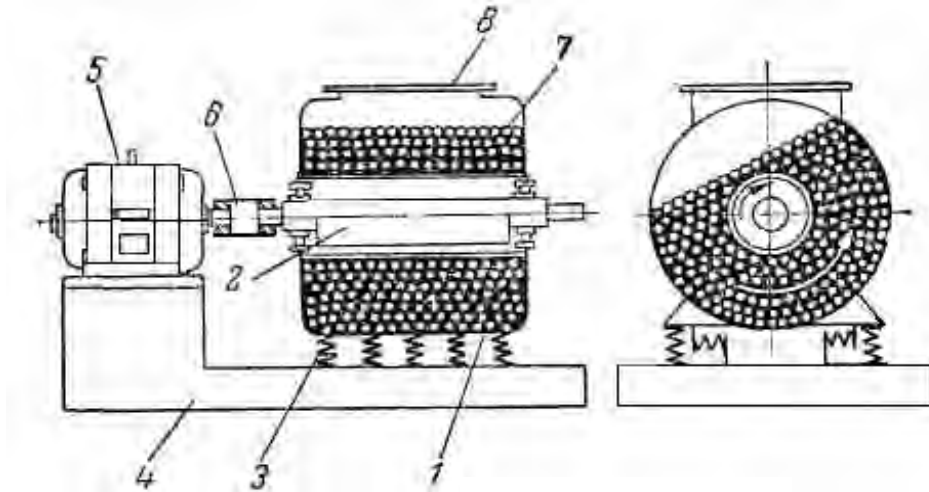
Вибрационные мельницы по принципу возбуждения колебаний делятся на инерционные (рис. 1, а) и гирационные (рис. 1, б). Инерционные мельницы приводятся в движение центробежными вибровозбудителями, а гирационные – эксцентриковым вибровозбудителем. Гирационные мельницы обладают той же эффективностью измельчения, что и инерционные, но в связи со сложностя-

ми, возникающими при их уравнивании, не получили широкого распространения в промышленности.

Основным достоинством инерци-

онных мельниц является относительная простота конструкции в сочетании с достаточно высокими рабочими параметрами.

а)



б)

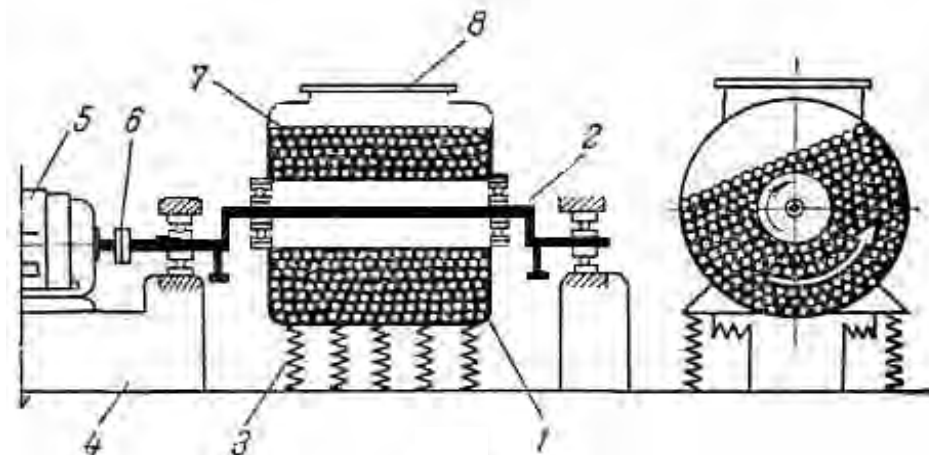


Рис. 1. Схема вибрационных мельниц с внутренним вибратором: а – инерционная; б – гиравционная; 1 – корпус; 2 – вибратор; 3 – опоры; 4 – рама; 5 – электродвигатель; 6 – муфта; 7 – мелющие тела (шары); 8 – люк

В промышленности нашли применение вибромельницы с рабочим объемом помольной камеры, равным 1–2000 дм<sup>3</sup>, круговой частотой колебаний помольной камеры 16–50 с<sup>-1</sup> и радиусом круговых колебаний 1–6 мм [3]. Вместе с тем, у серийно выпускаемых промышленных мельниц круговая частота колебаний, как правило, не превышает 30 с<sup>-1</sup>, и амплитуда – не более 3 мм. При этом максималь-

ное ускорение размалывающих тел достигает 100 м·с<sup>-2</sup>. Энергонапряженность этих вибромельниц, как и серийно выпускаемых аттрикторов, в большинстве случаев является недостаточной для осуществления механохимического синтеза в металлических системах [3].

Так, реакционное механическое легирование алюминиевых композиций с приемлемой для практики скоростью

может осуществляться в механореакторе, обеспечивающем нормальное ускорение размалывающих тел более  $100 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ , медных – более  $120 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ , железных и никелевых – более  $140 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  [1]. Накопленный авторами большой объем экспериментальных данных позволяет сделать однозначный вывод, что универсальным является механореактор-вибромельница с центральным вибратором, обеспечивающий ускорение рабочих тел  $150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ , являющийся предметом данной разработки.

Исходными данными для проектирования являлись:

нормальное ускорение корпуса и рабочих тел, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ .....	150
объем помольной камеры, $\text{м}^3$ .....	0,03;
степень заполнения помольной камеры рабочими телами (шарами), %.....	75;
материал рабочих тел .....	сталь ШХ15СГ;
диаметр рабочих тел, мм...	11,15;
отношение объема рабочих тел к объему шихты.....	8;
электродвигатель.....	асинхронный;
частота вращения, $\text{мин}^{-1}$ ....	1450

Основными расчетными параметрами механореактора являются: амплитуда колебаний; масса дебаланса; возмущающая сила дебаланса.

### Определение амплитуды круговых колебаний

Амплитуду круговых колебаний находим по формуле

$$a = \omega^2 \cdot A, \quad (1)$$

где  $a$  – нормальное ускорение корпуса,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ ;  $\omega$  – круговая частота колебаний корпуса,  $\text{с}^{-1}$ ;  $A$  – амплитуда круговых колебаний корпуса, м.

Круговая частота колебаний корпуса определяется по формуле

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1450}{30} = 152 \text{ с}^{-1}; \quad (2)$$

$$A = \frac{a}{\omega^2} = \frac{150}{152^2} = 0,0065 \text{ м}, \quad (3)$$

где  $\omega$  – круговая частота колебаний корпуса,  $\text{с}^{-1}$ .

### Определение массы дебаланса

Масса дебаланса находится из условия равновесия:

$$M_\delta \cdot R_\delta = M \cdot A, \quad (4),$$

где  $M_\delta$  – масса дебаланса, кг;  $R_\delta$  – расстояние до центра масс дебаланса, м ( $R_\delta = 0,0316$  – для дебаланса полукруглой формы с наружным радиусом 0,1 м);  $M$  – расчетная масса помольной камеры с загрузкой, кг.

Расчетная масса помольной камеры определяется по формуле

$$M = m_k + k(m_{ш} + m_z), \quad (5)$$

где  $m_k$  – масса корпуса мельницы, кг ( $m_k = 173$  кг из конструктивных расчетов);  $k$  – коэффициент присоединения масс ( $k = 0,2 \dots 0,3$ , принимаем  $k = 0,3$ );  $m_{ш}$  – масса рабочих тел (шаров), кг (принимаем из расчета 3 кг шаров на  $1 \text{ дм}^3$  объема помольной камеры,  $m_{ш} = 3 \cdot 30 = 90$  кг);  $m_z$  – масса загрузки, кг (принимаем из расчета 0,4 кг на  $1 \text{ дм}^3$  объема помольной камеры,  $m_z = 0,4 \cdot 30 = 12$  кг).

$$M = 173 + 0,3(90 + 12) = 203,6 \text{ кг},$$

тогда масса дебаланса равна:

$$M_\delta = \frac{M \cdot A}{r_\delta} = \frac{203,6 \cdot 0,0065}{0,0316} = 41,88 \text{ кг}.$$

### Расчет возмущающей силы дебаланса

Возмущающая сила определяется по формуле

$$F = a_\delta m_\delta, \quad (6),$$

где  $a_\delta$  – ускорение центра масс дебаланса,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ .

$$a_0 = \omega^2 \cdot r_0 = 152^2 \cdot 0,0136 = 730 \text{ м с}^{-2};$$

$$F = 730 \cdot 41,88 = 30\,572 \text{ Н.}$$

Результаты расчета основных параметров механореактора являются исходны-

ми данными для инженерных расчетов и проектировочных работ.

Принципиальная схема разработанного аппарата с инерционным приводом представлена на рис. 2.

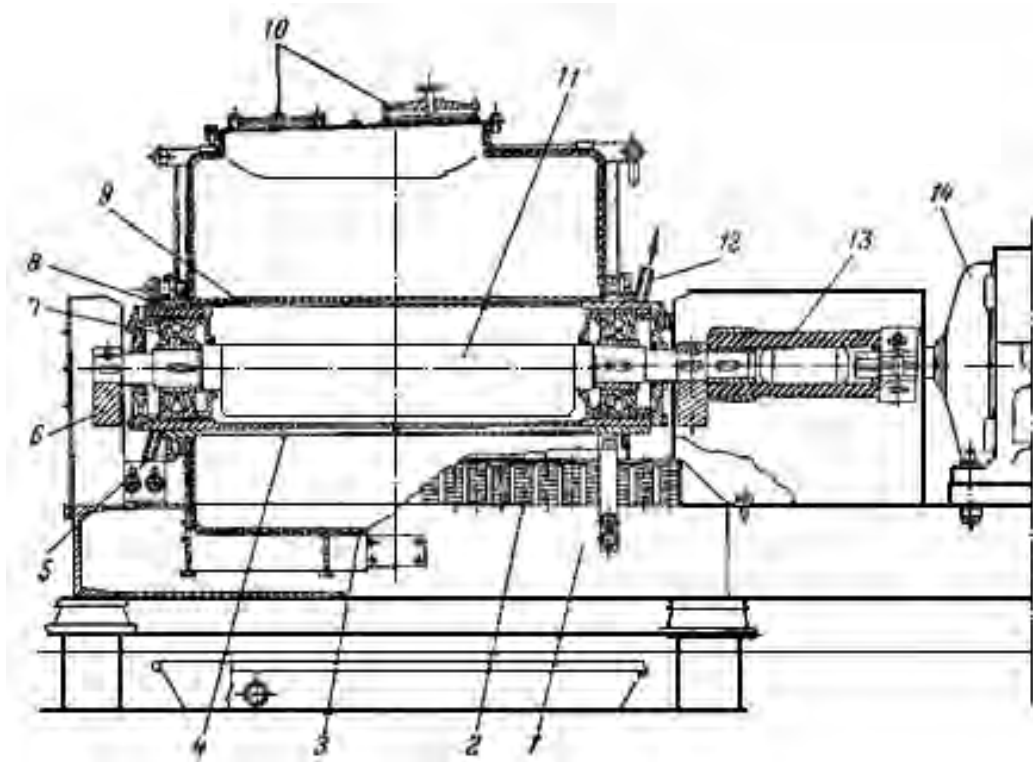


Рис. 2. Инерционная мельница с центральным вибратором: 1 – опорная рама; 2 – пружины; 3 – корпус мельницы; 4 – внутренняя труба (кожух); 5 – штуцер для охлаждающей воды; 6 – дополнительный дебаланс; 7 – подшипник; 8 – разрезные крепежные кольца; 9 – гильза вибратора; 10 – загрузочно-разгрузочный люк; 11 – вал с дебалансом; 12 – штуцер для охлаждающей воды; 13 – эластичная муфта; 14 – электродвигатель

Электродвигатель 14 через муфту 13 приводит во вращение дебалансный вал 11 вибратора, установленного на подшипниках 7. При вращении дебалансного вала возникают круговые вынужденные колебания корпуса 3 мельницы, установленного на пружинах сжатия 2. Колебания корпуса передаются загруженным в него шаровым мелющим телам и шихте, совершающим сложное циркуляционное движение. Мелющие тела с ускорением перемещаются и соударяются друг с другом, корпусом рабочей камеры, кожухом вибратора и шихтой, что приводит к механическому легированию. Основное количество механической

энергии превращается в тепловую. Для предотвращения разогрева рабочих тел и шихты, а также тяжелонагруженных подшипников разработана система водяного охлаждения корпуса механореактора, кожуха вибратора и опор подшипников.

Проведенные исследования показали, что размещение вибратора внутри рабочей камеры приводит к увеличению энергонапряженности механореактора в 1,35–1,40 раз, что существенно интенсифицирует механохимические превращения. Энергонапряженность – потребляемая мощность на 1 дм<sup>3</sup> рабочего объема помольной камеры – достигает 0,36 кВт.

Повышение ее обусловлено тем, что кожух вибратора, расположенный в центре полевой камеры, сообщает загрузке дополнительную кинетическую энергию, восстанавливая амплитуду гаснущих вынужденных колебаний, и тем самым устраняет «застойную» зону.

Теоретические расчеты и экспериментальная проверка их показали [4–6], что разработанный высоконапряженный механореактор на основе вибромельницы инерционного типа обеспечивает реализацию реакционного механического легирования за счет оптимального сочетания воздействий лобового и скользящего ударов. Лобовые удары обеспечивают максимальную деформацию и большую скорость генерации неравновесных точечных дефектов, что содействует ускорению диффузии при механическом легировании в металлических системах. А скользящие

удары вызывают нагрев, являющийся достаточным для инициирования механохимических превращений по тепловому механизму.

Высокая эффективность спроектированного и изготовленного промышленного механореактора на основе шаровой мельницы инерционного типа подтверждается многочисленными результатами экспериментальных исследований [1]. С использованием данного механореактора получены нанокристаллические дисперсно-упрочненные механически легированные материалы на основе меди, алюминия, железа и никеля различного функционального назначения, обладающие повышенным комплексом физико-механических свойств по сравнению с традиционными (табл. 1).

Табл. 1. Физико-механические свойства созданных с применением промышленного механореактора инерционного типа наноструктурных композиционных жаропрочных материалов

Группа материалов	Система материалов	Физико-механические свойства
1	2	3
<i>Железные</i>		
Конструкционные стали общего назначения	15X2H4	23 HRC, $\sigma_B = 754$ МПа, $\delta = 16$ %
Жаропрочные стали общего назначения	15MЮ	35 HRC, $\sigma_B = 990$ МПа, $\delta = 11$ %
Жаропрочные стали специального назначения	15X1MФ	24 HRC, $\sigma_B = 740$ МПа, $\delta = 14$ %
	15X11MФ	49 HRC, $\sigma_B = 1337$ МПа, $\delta = 7$ %
	15X18H10T	42 HRC, $\sigma_B = 1150$ МПа, $\delta = 12$ %
<i>Никелевые</i>		
Композиционные	ND-никель	32 HRC, $\sigma_B = 850$ МПа, $\delta = 6$ %
Нимоники	Cr-Ni-Ti-Al	40 HRC, $\sigma_B = 1080$ МПа, $\delta = 3$ %
	Cr-Ni-Ti-Al-Mo-W	60 HRC, $\sigma_B = 1740$ МПа, $\delta = 1$ %
<i>Алюминиевые</i>		
Высокопрочные	Al-Mg-N-O-C	$\sigma_B = 680-770$ МПа, $\sigma_B^{500} = 100-170$ МПа
	Al-Mg-Mo-O-C	$\sigma_B = 680$ МПа, $\sigma_B^{500} = 120$ МПа
	Al-Mg-Zr-O-C	$\sigma_B = 660$ МПа, $\sigma_B^{500} = 110$ МПа
	Al-Mo-O-C	$\sigma_B = 560$ МПа, $\sigma_B^{500} = 170$ МПа, $\sigma_{100}^{550} = 120$ МПа

Окончание табл. 1

1	2	3
	Al-Zr-O-C	$\sigma_B = 500$ МПа, $\sigma_B^{550} = 135$ МПа, $\sigma_{100}^{550} = 85$ МПа
Низкой плотности	Al-Mg-Li-O-C	$\sigma_B = 550-600$ МПа, $\sigma_B^{400} = 100-110$ МПа, $d = 2,5-2,6$ г·см <sup>-3</sup>
С низким коэффициентом линейного расширения	Al-Si-Ni-O-C	$\sigma_B = 440-460$ МПа, $\sigma_B^{500} = 110-120$ МПа, $\sigma_{100}^{500} = 70-75$ МПа, $\alpha = (17,5-18,0) \cdot 10^{-6}$ К <sup>-1</sup>
С большим значением эффективного сечения захвата тепловых нейтронов	Al-B-O-C	$\sigma_B = 480-520$ МПа, $\sigma_B^{500} = 130-150$ МПа, $\sigma_{100}^{500} = 80-100$ МПа, эффективное сечение захвата тепловых нейтронов 300–400 барн
С высоким значением электропроводности	Al-Mg-O-C	$\sigma_B = 210-350$ МПа, $\sigma_B^{350} = 90-120$ МПа, $\sigma_B^{500} = 54-80$ МПа, $\sigma_{100}^{500} = 40-70$ МПа, $\delta = 11$ %, $\rho = (0,50-0,53) \rho_{Cu}$
<i>Медные</i>		
Высокопрочные	Cu-Al	НВ 250, $\sigma_B = 1100$ МПа, $\delta = 2-3$ %
Высокопрочные с низким значением электрического сопротивления	Cu-Al-Mo-O	НВ 170–240, $\sigma_B = 850-950$ МПа, $\sigma_B^{500} = 300-350$ , $\sigma_{100}^{500} = 200-230$ МПа, $\rho = (2,3-2,4) \cdot 10^{-8}$ Ом·м

*Примечание.* Температура рекристаллизации всех материалов – выше  $0,75T_{пл}$  основы.

Применение разработанного механореактора позволяет получать механически легированные материалы на основе металлов, имеющие микрокристаллический тип структуры основы, характеризующейся высокоразвитой поверхностью раздела границ зерен и субзерен, стабилизированной наноразмерными, возникающими в результате твердофазного синтеза, термодинамически стабильными частицами упрочняющих фаз, что обеспечивает высокий уровень физико-механических свойств, и, прежде всего, жаропрочности, чего нельзя добиться традиционными металлургическими методами. Сопоставление физико-механических свойств, включающих характеристики прочности и жаропрочности, раз-

работанных материалов и сплавов, получаемых по традиционной технологии, однозначно указывает на превосходство первых.

По сравнению с традиционно применяемыми атриторами разработанный аппарат (инерционная мельница с центральным вибратором) наряду с функциональными преимуществами имеет ряд экономических. Результаты сравнительных экспериментальных исследований показали, что производительность вибромельниц в 1,3–1,6 раза выше, а затраты энергии на единицу продукции в 1,4–1,7 раза ниже, чем у атриторов. Кроме этого, при одной и той же энергонапряженности вибромельницы по надежности и долговеч-

ности в 3–5 раз превосходят аттриторы.

### Заключение

Анализ существующих механореакторов различного типа показал, что с учетом таких факторов, как энергонапряженность, надежность, производительность и долговечность наиболее перспективными для промышленного изготовления дисперсно-упрочненных жаропрочных материалов на основе алюминия, меди, железа и никеля являются вибрационные мельницы инерционного типа.

Серийно выпускаемые вибрационные аппараты имеют относительно низкую энергонапряженность и являются малоэффективными для осуществления реакционного механического легирования. Этот процесс в алюминиевых композициях с приемлемой для практики скоростью может осуществляться в механореакторе, обеспечивающем нормальное ускорение размалывающих тел более  $100 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ , медных – более  $120 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ , железных и никелевых – более  $140 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ . Для осуществления реакционного механического легирования универсальным является механореактор, обеспечивающий нормальное ускорение размалывающих тел  $150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ . Это достигается при круговой частоте колебаний корпуса  $152 \text{ с}^{-1}$  и амплитуде колебаний 6,5 мм.

Размещение вибратора внутри рабочей камеры приводит к увеличению энергонапряженности в 1,35–1,40 раза.

Разработанный высоконапряженный механореактор на основе вибромельницы инерционного типа обеспечивает реализацию реакционного механического легирования за счет оптимального сочетания воздействий лобового и скользящего ударов. Лобовые удары обеспечивают максимальную деформацию и большую скорость генерации неравновесных точечных дефектов, что содействует ускорению диффузии при механическом легировании в металлических системах. Скользящие удары вызывают нагрев, являющийся достаточным для инициирова-

ния механохимических превращений по тепловому механизму.

Применение разработанного механореактора позволяет получать механически легированные материалы на основе металлов, имеющие микрокристаллический тип структуры основы, характеризующейся высокоразвитой поверхностью раздела границ зерен и субзерен, стабилизированной наноразмерными, возникающими в результате твердофазного синтеза, термодинамически стабильными частицами упрочняющих фаз, что обеспечивает высокий уровень физико-механических свойств, и, прежде всего, жаропрочности, чего нельзя добиться традиционными металлургическими методами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 276 с.
2. **Кипарисов, С. С.** Оборудование предприятий порошковой металлургии / С. С. Кипарисов, О. В. Падалко. – М. : Металлургия, 1988. – 44 с.
3. **Бурков, С. Н.** Расчет вибромашин и вибровозбудителей / С. Н. Бурков. – М. : Машиностроение, 1978. – 384 с.
4. **Ловшенко, Г. Ф.** Оценка факторов, активизирующих механохимические превращения при механическом легировании в вибромельнице / Г. Ф. Ловшенко, Б. Б. Хина // Трение и износ, 2005. – Т. 26, № 4. – С. 434–445.
5. **Ловшенко, Ф. Г.** Локальный разогрев и пластическая деформация порошковой композиции упругим лобовым ударом при механическом легировании в вибромельнице / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Перспективные технологии, материалы и системы : сб. науч. тр. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – С. 184–192.
6. **Ловшенко, Ф. Г.** Локальный разогрев и пластическая деформация порошковой композиции скользящим ударом при механическом легировании в вибромельнице / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Перспективные технологии, материалы и системы : сб. науч. тр. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – С. 193–200.



Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 05.10.2007

**G. F. Lovshenko, Z. M. Lovshenko, A. I. Habibullin**  
**Highly effective machine for reactionary mechanical**  
**alloyment of metal systems**  
Belarusian-Russian University

The analysis of machines of different constructions applied for solids dispersing which differ from each other by the kind of mechanical force on the substance. The equipment providing with realization of reactionary mechanical alloyment for receiving nanostructural highly stable composition materials based on metals has been theoretically substantiated and experimentally proved. Calculations proving the construction's operability and its technical characteristic have been given.

Электронная библиотека  
Белорусско-Российского университета