

## Наноструктурные композиционные жаропрочные механически легированные материалы с особыми свойствами и изделия из них

*Г. Ф. Ловиенко*, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет  
*Ф. Г. Ловиенко*, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет

Научно-технический прогресс в различных отраслях промышленности требует создания материалов, способных повысить надёжность и долговечность изделий и снизить их материалоемкость. Высоким комплексом физико-механических свойств обладают дисперсно-упрочнённые композиционные материалы. Однако, как и другие композиционные материалы, они широко применения не нашли, что обусловлено отсутствием прогрессивных методов и современных промышленных технологий их получения. В связи с этим представляет интерес технология, основанная на реакционном механическом легировании.

Типовая технология получения дисперсно-упрочнённых материалов, основанная на реакционном механическом легировании включает следующие стадии: подбор исходных компонентов и прогнозирование фазового состава материала; реакционное механическое легирование, обеспечивающее получение дисперсно-упрочнённой гранулированной композиции; холодное брикетирование; термическая обработка брикетов; получение полуфабрикатов методом горячего прессования. В качестве исходного сырья применяются стандартные порошки металлов и легирующих добавок.

На начальном этапе размола в результате многократно повторяющихся процессов пластической деформации, разрушения, адгезии, агломерации и сварки образуется гранулированная композиция. Установлено, что развитию химического взаимодействия между компонентами предшествует гомогенизация композиции, которая протекает за счёт деформационного и диффузионного перемещения компонентов. Наиболее значительным представляется второй фактор. При этом имеют место термически и механически активируемая диффузия.

Универсальным является механизм формирования структуры основы композиций, обрабатываемой в механореакторе. Он обусловлен протеканием процессов динамической рекристаллизации и включает следующие стадии: накопление дислокаций до максимально возможного значения ( $\rho > 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), имеющее место при размоле примерно в течение одного часа, перестройка дислокаций и образование фрагментированной субструктуры, превращение фрагментов в кристаллиты. Основа гранулированных композиций независимо от их состава имеет субмикроструктурный тип структуры с размером зерна  $< 100 \text{ нм}$ , состоящего из блоков величиной  $\leq 50 \text{ нм}$ . Плотность дислокаций относи-

тельно низка и находится в пределах  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>, искажения кристаллической решетки  $\approx 10^{-3}$ .

При реакционном механическом легировании установлено образование твёрдых растворов и соединений. Универсальным является механизм формирования твёрдых растворов, в определённой мере раскрывающий и образование соединений. На начальной стадии обработки в результате деформационного перемещения компонентов формируется неоднородный по составу квазираствор. Далее следует образование нескольких твёрдых растворов и гомогенизация композиции. Причём процесс, как правило, заканчивается на второй стадии и существует, по меньшей мере, два твёрдых раствора — основной и дополнительный. Концентрация легирующего элемента в основном — ниже средней, а в дополнительном — примерно соответствует его содержанию в ближайшем интерметаллическом соединении. Формирование химических соединений происходит через ряд промежуточных стадий, одной из которых является образование пересыщенного твёрдого раствора. Механически синтезированные фазы находятся в ультрадисперсном состоянии с размером частиц менее 10 нм и, как правило, рентгеноаморфны. Это, прежде всего, характерно для оксидов, карбидов и нитридов. Независимо от исходного состава шихты и условий обработки в механореакторе фазовый состав механически легированных композиций не достигает равновесного, и они являются термодинамически неравновесными системами. Во всех случаях определённая часть легирующего компонента остаётся в виде включений размером менее 0,1 мкм.

Отжиг механически легированных композиций активирует фазовые превращения, приближающие систему к термодинамическому равновесию. Наличие всех равновесных фаз установлено после длительной выдержки при температурах более  $0,75 T_{\text{пл}}$  основы. Механически

легированные композиции, характеризующиеся субмикроструктурным типом структуры с высоко развитой поверхностью границ зёрен и субзёрен, стабилизированных наноразмерными выделениями механически синтезированных фаз, не имеющих контакта друг с другом, стойки против высокотемпературного воздействия. Разупрочнение отмечается при увеличении размера избыточных фаз более 100 нм. Температура, при которой имеет место это явление, зависит от природы основы и упрочняющей фазы, но в любом случае она находится не ниже  $0,75 T_{\text{пл}}$  основы.

Получение полуфабрикатов требуется проводить горячей экструзией холоднопрессованных брикетов. Оптимальная температура процесса —  $0,70—0,75 T_{\text{пл}}$  основы, степень обжатия — более 10.

Материалы, изготовленные по оптимальной технологии, имеют микроструктурный тип структуры основы с размером равноосных зёрен менее 1 мкм (обычно 0,2—0,7 мкм), разделённых на блоки величиной  $<0,1$  мкм. Границы зёрен и субзёрен стабилизированы глобулярными наноразмерными выделениями упрочняющих фаз, размер которых в зависимости от их природы изменяется в пределах 10—100 нм. Для материалов характерна низкая плотность дислокаций  $\approx 10^8$  см<sup>-2</sup>.

Технология, основанная на реакционном механическом легировании, обеспечивает получение материалов, которые по прочности и, прежде всего, характеристикам жаропрочности примерно в 1,5 раза превосходят известные, что обусловлено высокой стабильностью элементов тонкой структуры.

По результатам проводимых исследований создан ряд наноструктурных композиционных жаропрочных механически легированных материалов (таблица), которые могут найти и находят применение в различных отраслях промышленности.

*Типы и физико-механические свойства разработанных наноструктурных композиционных жаропрочных материалов*

Группа материалов	Физико-механические свойства
алюминиевые	
высокопрочные	$\sigma_B = 5000\text{—}770$ МПа, $\sigma_B^{500} = 100\text{—}170$ МПа, $\sigma_{100}^{550} = 85\text{—}120$ МПа
низкой плотности	$\sigma_B = 550\text{—}600$ МПа, $\sigma_B^{400} = 100\text{—}110$ МПа, $d = 2,5\text{—}2,6$ г·см <sup>-3</sup>
с низким коэффициентом линейного расширения	$\sigma_B = 440\text{—}460$ МПа, $\sigma_B^{500} = 110\text{—}120$ МПа, $\sigma_{100}^{500} = 70\text{—}75$ МПа, $\alpha = (17,5\text{—}18,0) \cdot 10^{-6}$ К <sup>-1</sup>
с большим значением эффективного сечения захвата тепловых нейтронов	$\sigma_B = 480\text{—}520$ МПа, $\sigma_B^{500} = 130\text{—}150$ МПа, $\sigma_{100}^{500} = 80\text{—}100$ МПа, эффективное сечение захвата тепловых нейтронов — 300—400 барн
с высоким значением электропроводности	$\sigma_B = 210\text{—}350$ МПа, $\sigma_B^{350} = 90\text{—}120$ МПа, $\sigma_B^{500} = 54\text{—}80$ МПа, $\sigma_{100}^{500} = 40\text{—}70$ МПа, $\delta = 11$ %, $\rho = (0,50\text{—}0,53)\rho_{Cu}$
медные	
высокопрочные	НВ 250, $\sigma_B = 1100$ МПа, $\delta = 2\text{—}3$ %
высокопрочные с низким значением электрического сопротивления	НВ 170—240, $\sigma_B = 850\text{—}950$ МПа, $\sigma_B^{500} = 300\text{—}350$ , $\sigma_{100}^{500} = 200\text{—}230$ МПа, $\rho = (2,3\text{—}2,4) \cdot 10^{-8}$ Ом·м
железные	
конструкционные стали общего назначения	HRC 24—26, $\sigma_B = 770$ МПа, $\delta = 14$ %
жаропрочные стали общего назначения	HRC 34, $\sigma_B = 970$ МПа, $\delta = 9$ %, $\sigma_{100}^{600} = 500$ МПа, $\sigma_{100}^{700} = 350$ МПа, $\sigma_{100}^{800} = 200$ МПа
жаропрочные стали специального назначения	HRC 46—54, $\sigma_B = 1150\text{—}1400$ МПа, $\delta = 3\text{—}6$ %, $\sigma_{100}^{600} = 500$ МПа, $\sigma_{100}^{700} = 350$ МПа, $\sigma_{100}^{800} = 200$ МПа
никелевые	
жаропрочные	HRC 55—57, $\sigma_B = 1100\text{—}1300$ МПа, $\delta = 2\text{—}6$ %

Так, например, материалы на основе нержавеющей стали предполагается использовать в конструкциях атомных реакторов, подверженных интенсивному радиационному облучению и в интервале температур 700—900 °С способны заменить сплавы на основе никеля; высокопрочные никелевые материалы — для деталей турбино-, авиа-, ракетостроения, работающих в жестких температурно-силовых условиях.

Материалы на основе меди, получаемые по разработанной технологии, нашли применение

для изготовления ряда изделий. Так в Белорусско-Российском университете освоено производство высокостойких изделий электротехнического назначения типа электродов контактной точечной сварки и токоподводящих наконечников сварочных полуавтоматов, ранее импортированных в Республику Беларусь. Также создано малотоннажное наукоёмкое предприятие по изготовлению металлических порошков на основе железа и никеля для газотермического напыления высокостойких покрытий.