

УДК 621.923

О. В. Игнатенко<sup>1</sup>, канд. физ-мат. наук; А. М. Кузей<sup>2</sup>, докт. техн. наук; А. В. Францкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, г. Минск

<sup>2</sup>Государственное научное учреждение «Физико-технический институт национальной академии наук Беларуси», г. Минск

## КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В КОМПОЗИЦИОННЫХ ГРАНУЛАХ Ni-Al ПРИ ТЕРМОБАРИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

Методами оптической, электронной микроскопии, рентгеновского анализа, изучены процессы взаимодействия в системе Ni-Al в области температур 1075–1775 К и при давлениях  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 3,5 ГПа.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, композиционные гранулы, термобарический отжиг, контактное взаимодействие

### Введение

Технологические процессы получения композиционных материалов основаны на операции совмещения армирующих элементов (волокон, усов, сеток, дисперсных частиц и т.д.) и матрицы электрохимическими, металлургическими и физическими методами [1, 2]. В технологических процессах получения композиционных материалов методами порошковой металлургии операция формирования композиционного материала совмещена с операцией формирования матрицы. Основным механизмом формирования гомогенной, однородной матрицы из компакта дисперсных металлических частиц, является процесс диффузии (реакционной диффузии), протекающей в твердом, твердо-жидком и жидком состояниях.

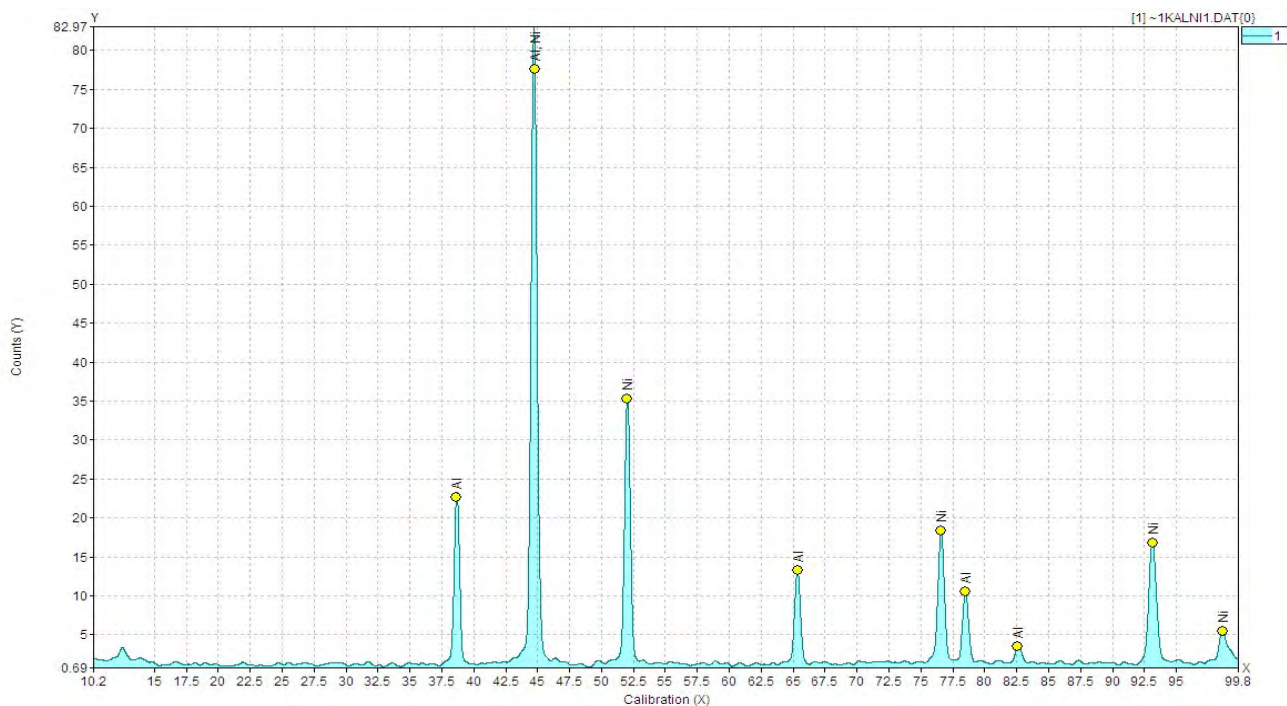
Завершенность процессов диффузионного перераспределения элементов, гомогенность состава матрицы композиционного материала определяется режимами синтеза и дисперсностью компонентов. Взаимодействие в гетерогенных системах Cu-Sn, Al-Zn-Cu, Cu-Zn-Sn, на основе которых производится значительная часть алмазосодержащих композиционных материалов, протекает достаточно быстро в области невысоких (875–925 К) температур.

Высокие скорости контактного взаимодействия в этих системах обусловлены низкой температурой образования жидкой фазы. Однако это достоинство матриц на основе Cu-Sn, Al-Zn-Cu, Cu-Zn-Sn нивелируется относительно невысокой прочностью и жаропрочностью сплавов: введение легкоплавких компонентов снижает температуру начала плавления сплава. В отличие от этих систем в системе Ni-Al введение легкоплавкого элемента повышает температуру начала плавления сплава, его прочностные и физико-химические характеристики [3].

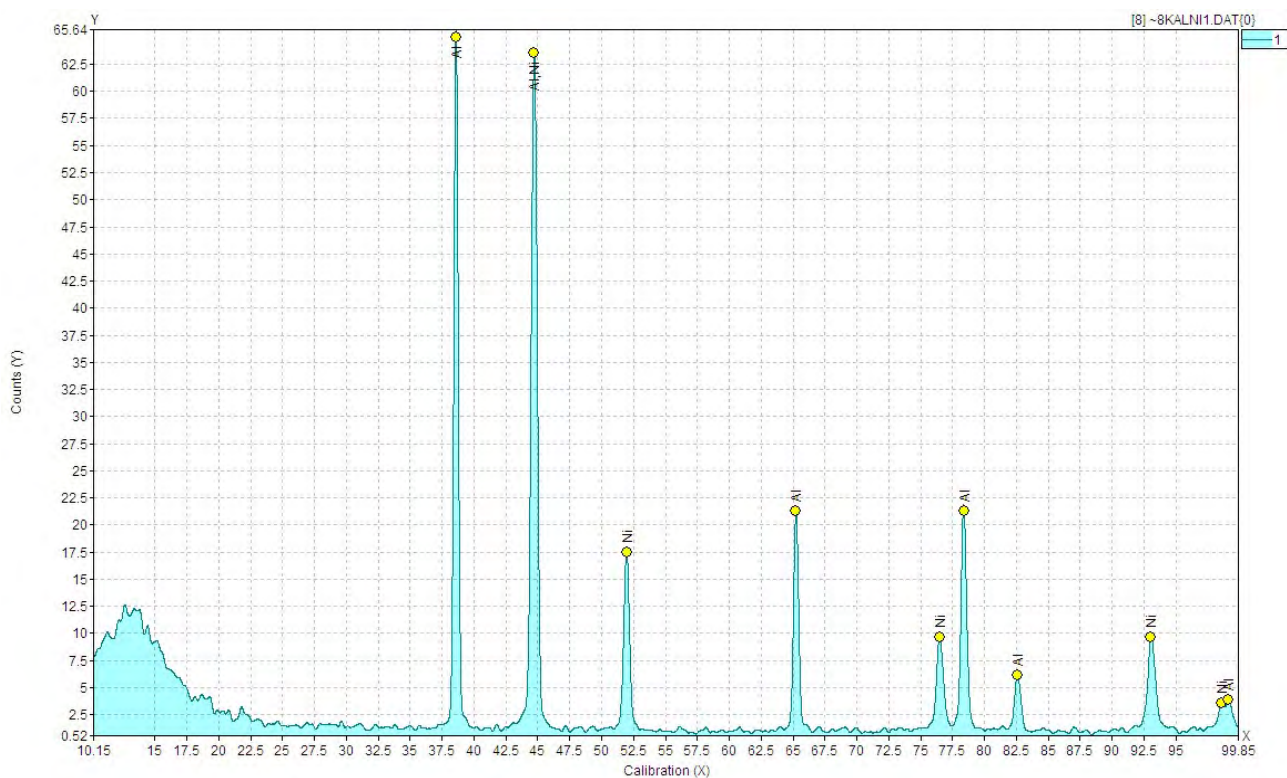
В работе методами оптической, электронной микроскопии, рентгеновского анализа, изучены процессы взаимодействия в системе Ni-Al в области температур 1075–1775 К и при давлениях  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 3, 5 ГПа.

### Методика исследований

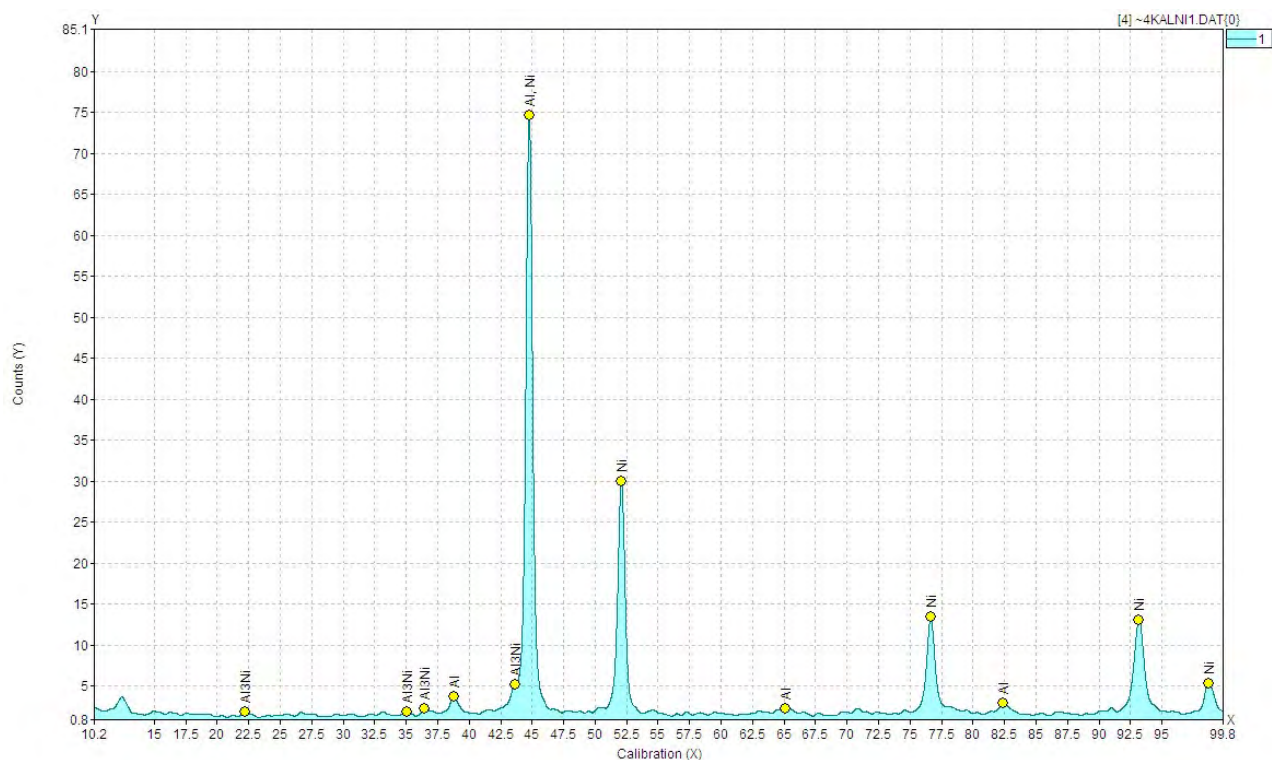
В качестве исходных компонентов применяли порошки никеля (НП-1) фракций 50–40 мкм, алюминия (ПА-3) фракции 50–40 мкм и их смесей с концентрацией алюминия 10 и 30 мас.%. Смеси получали совместным размолотом порошков алюминия и никеля в атриторе в течение 6 часов. После размолота отсеивали фракцию порошка 80–40 мкм. В исходном состоянии смеси представляли собой гранулы, состоящие из частиц никеля и алюминия. Термобарический отжиг гранул Ni – 10 мас.% Al приводит к появлению фазы Ni<sub>3</sub>Al уже при температуре 775 К. Повышение температуры спекания до 1075; 1275; 1475 К увеличивает концентрацию фазы Ni<sub>3</sub>Al, однако даже при температуре 1475 К в компакте остается никель (рис. 1, 2).



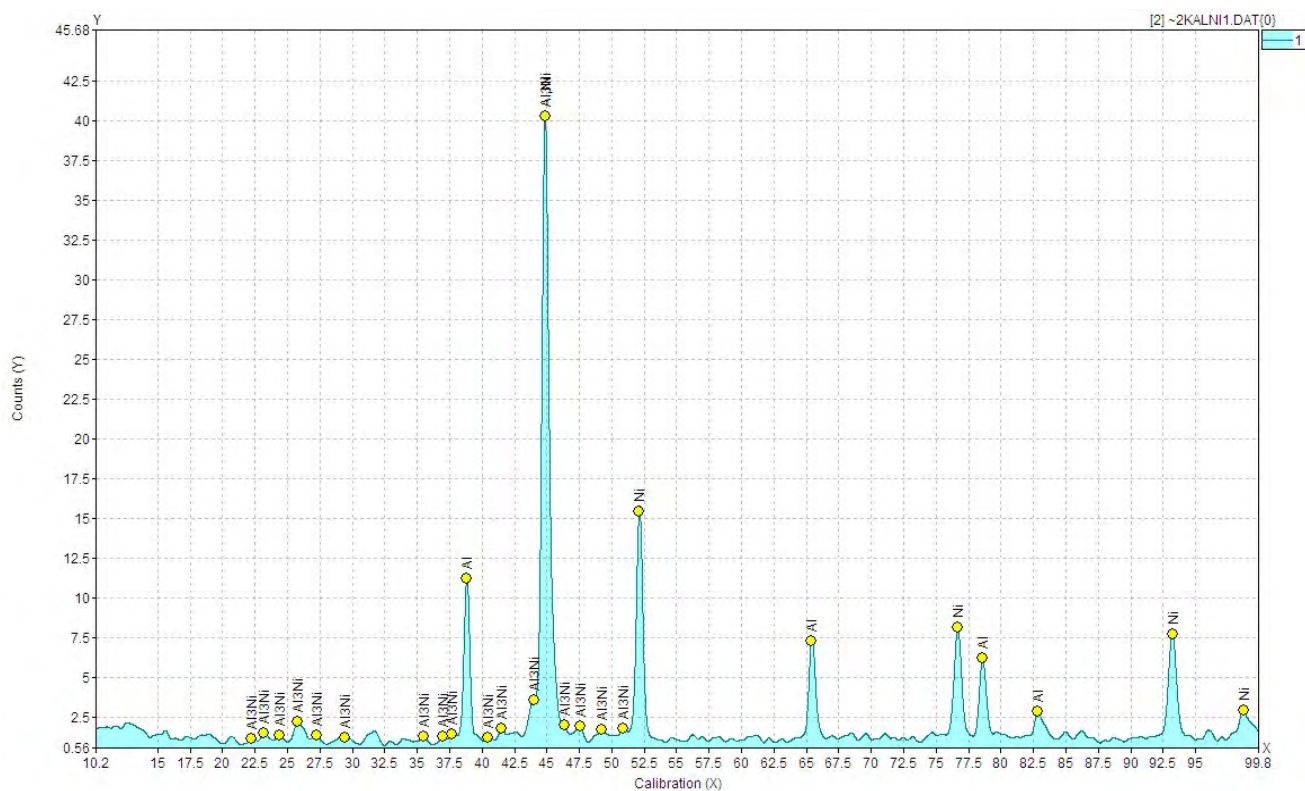
a



b



а



б

Рис. 1. Рентгенограммы композиционных порошков: а – Ni – 10 мас. % Al – исходное состояние; б – Ni – 30 мас. % Al – исходное состояние; в – Ni – 10 мас. % Al – спекание при 775 К, 5 ГПа, 5 мин; г – Ni-30 мас. % Al – спекание 1075 К, 5 ГПа, 5 мин



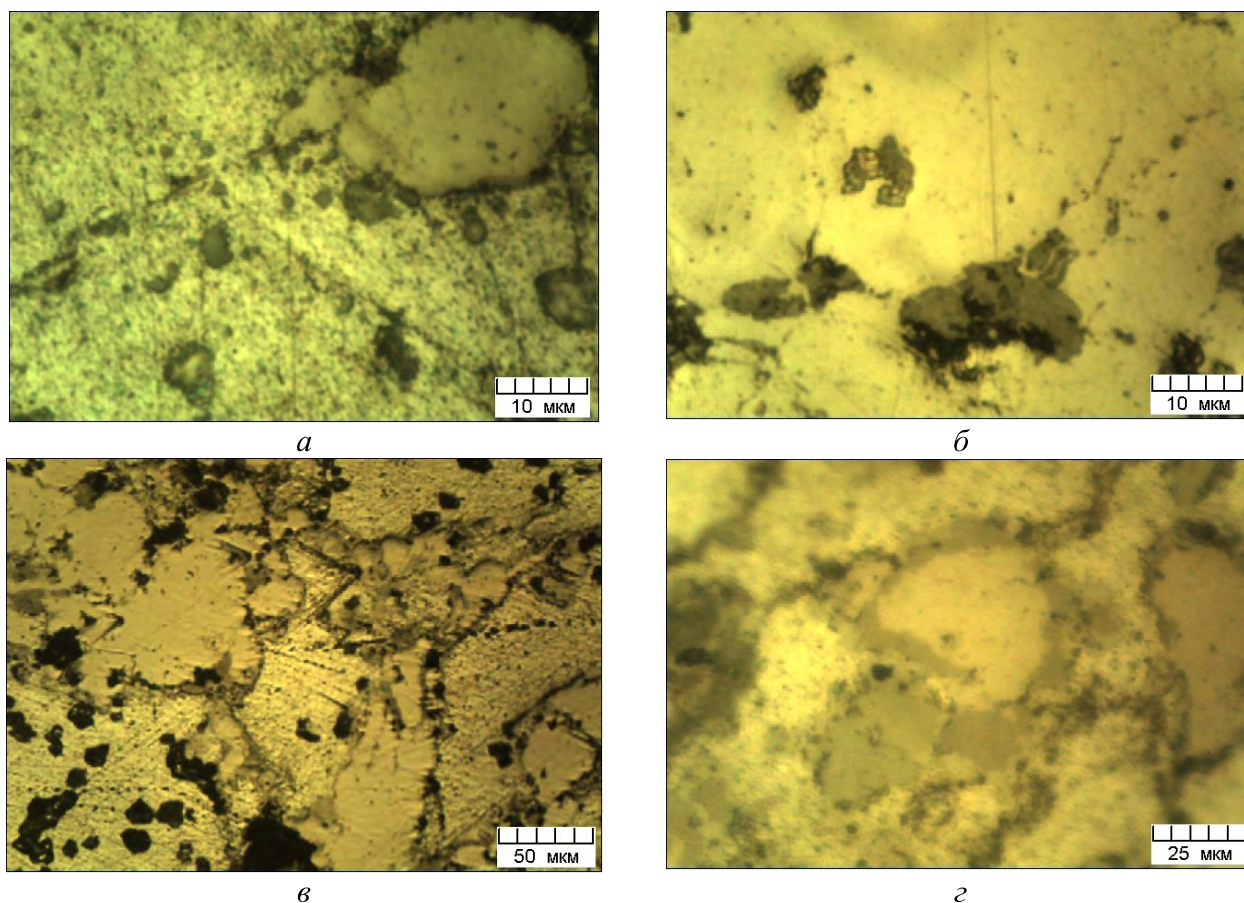


Рис. 2. Микроструктура компактов из гранул Ni – 10 мас. % Al: а – давление 5 ГПа, температура 775 К, длительность спекания 5 мин; б – давление 5 ГПа, температура 1075 К, длительность спекания 5 мин; в – давление 3 ГПа, температура 1275 К, длительность спекания 5 мин; г – давление 5 ГПа, температура 1775 К, длительность спекания 3 мин

Спекание компактов проводили в камере высокого давления в контейнерах из литографического камня. Давление спекания составляло 3 и 5 ГПа. Для сравнения компакты из гранул, полученные при давлении 5 ГПа и температуре 298 К, спекали в индукторе при скорости нагрева 50 К/с.

Термобарический отжиг компактов из гранул Ni – 30 мас. % Al сопровождается образованием фазы  $Al_3Ni$ . Увеличение температуры термобарического отжига до 1275; 1475 К не приводит к увеличению содержания фазы  $Al_3Ni$ , однако в компактах остаются значительные количества исходных компонентов – никеля и алюминия. Спекание компактов из гранул Ni – 10 мас. % Al при нормальном ( $1 \cdot 10^{-4}$  ГПа) давлении при 775 К в течение 3 и 5 минут приводит к образованию  $Ni_3Al$  и  $Al_3Ni$ . При температуре отжига 1200 К компакт представляет собой интерметаллид  $Ni_3Al$ . Спекание компактов из гранул Ni – 30 мас. % Al при нормальном давлении и температуре 775 К сопровождается образованием фазы  $Al_3Ni$  после пятиминутного отжига. Спекание при температурах 1075; 1275; 1775 К сопровождается термическими эффектами, разбрызгиванием расплава. После спекания в интервале температур 1275–1775 К и выдержек 3 и 5 минут компакт представляет собой сплавы на основе соединения  $AlNi$  с включениями частиц  $Ni_3Al$ ,  $Al_3Ni_2$ .

Процессы контактного взаимодействия в системе Ni–Al изучены достаточно подробно [4, 5]. При взаимодействии никеля с твердым и жидким алюминием в диффузионной зоне образуется две фазы  $Ni_3Al$ ,  $Al_3Ni_2$ . Взаимодействия в диффузионной паре Ni–Al начинается

при 725 К. Фазы AlNi и AlNi<sub>3</sub> не образуются, так как области гомогенности этих фаз значительно меньше, чем в алюминиды Al<sub>3</sub>Ni и Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> [4].

Образование алюминидов никеля сопровождается значительным тепловым эффектом [3]. Контактное взаимодействие компонентов в дисперсной форме приводит к повышению температуры шихты и переходу процесса в стадию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Совместный размол частиц никеля и алюминия в атриторе диспергирует шихту и гомогенизирует состав гранул, формирует развитую контактную поверхность между частицами никеля и алюминия. В подобных дисперсных системах Al–Ni взаимодействия при температурах существования жидкой фазы сопровождается значительным тепловым эффектом [6]. Интенсивное развитие контактного взаимодействия отмечается в компактах из гранул Ni–30 мас. % Al при температурах спекания 1075–1775 К и давлении 1·10<sup>-4</sup> ГПа.

Повышение давления спекания компактов до 3–5 ГПа снижает интенсивность взаимодействия между компонентами, несмотря на развитую сеть границ раздела между дисперсными частицами никеля и алюминия. Границы между частицами никеля и алюминия в компакте после спекания при 1075–1775 К блокированы прослойками алюминидов никеля (Ni<sub>3</sub>Al, Al<sub>3</sub>Ni). Прослойки между частицами никеля (и гранулами) состоят из округлых частиц фазы Al<sub>3</sub>Ni, при атмосферном давлении форма этих частиц игольчатая (рис. 3, в). Однако при температурах спекания 1775 К оба компонента присутствуют в жидком состоянии, фаза Al<sub>3</sub>Ni имеет меньшую температуру плавления и не может выступать эффективным кинетическим барьером, препятствующим контактному взаимодействию никеля и алюминия. Повышение давления синтеза подавляет конвекционное перемещение расплава в компакте и повышает вязкость расплавов, снижая скорость диффузионного перемещения компонентов.

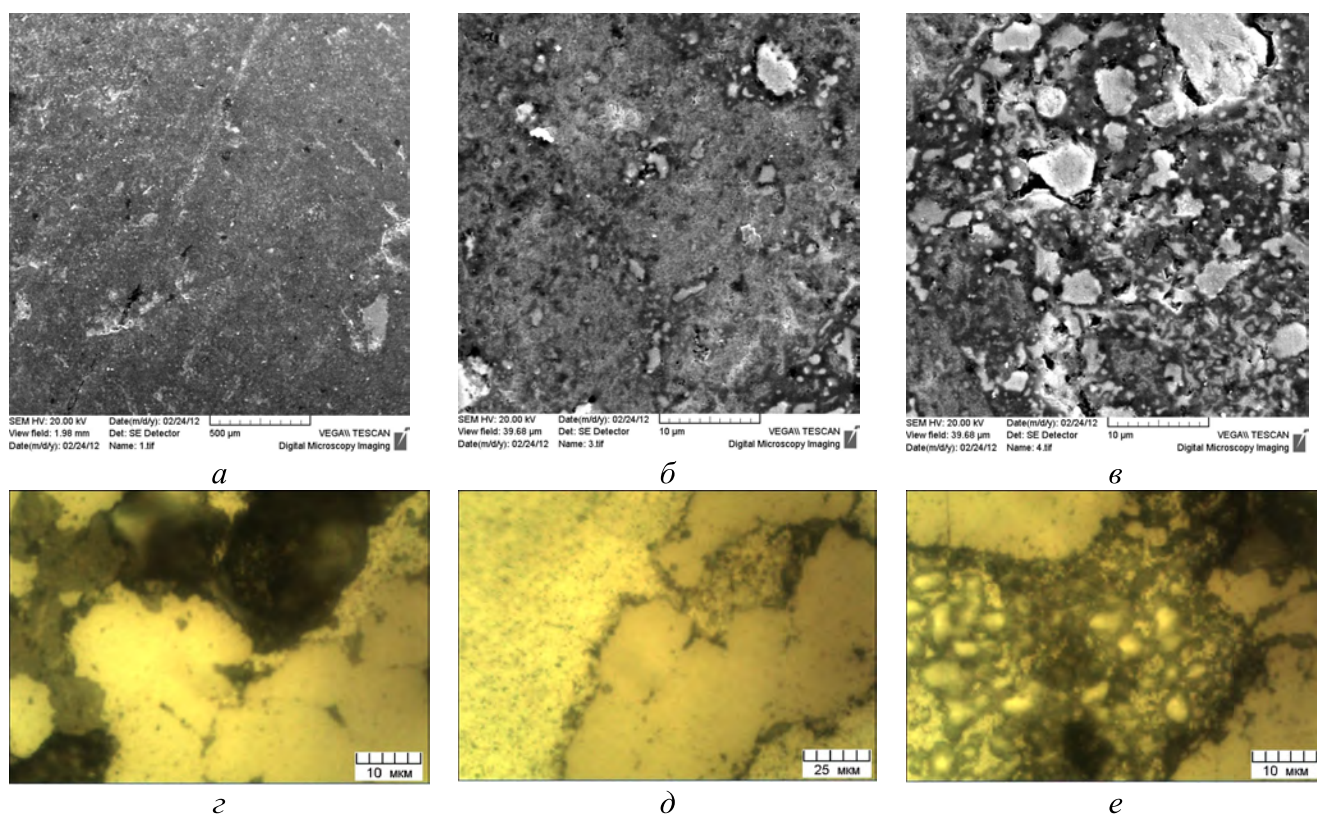


Рис. 3. Морфология (а) и микроструктура (б, в, г) компактов из гранул Ni – 10 мас. % Al: а, б – давление 5 ГПа, температура 1775 К, длительность спекания 3 мин; в – давление 3 ГПа, температура 1775 К, длительность спекания 3 мин; г – давление 5 ГПа, температура 1775 К, длительность спекания 5 мин; д – давление 5 ГПа, температура 1475 К, длительность спекания 5 мин; е – давление 5 ГПа, температура 1075 К, длительность спекания 3 мин

## Заключение

Повышенная стабильность композиционных гранул Ni – 10 мас. % Al, Ni – 30 мас. % Al при термобарическом отжиге в области существования жидкой фазы обусловлена двумя факторами. Повышение давления подавляет конвекционное перемешивание расплава в реакционной зоне, повышает вязкость расплавов. В результате стабилизируются жидкометаллические эмульсии и суспензии  $Ni_{ж}-Al_{ж}$ ,  $Ni_{г}-Al_{ж}$ . Формирование композиционных границ повышает интенсивность взаимодействия компонентов. Неоднородная структура гранул приводит к образованию множества дисперсных частиц алюминидов никеля, которые подавляют диффузионное перемещение компонентов в гранулах. Формирование гомогенных по составу сплавов систем Ni–Al требует использования компонентов в ультрадисперсном (0,5–1 мкм) состоянии.

*Методами оптичної, електронної мікроскопії, рентгенівського аналізу, вивчено процеси взаємодії в системі Ni–Al в області температур 1075–1775 К і при тисках  $1 \cdot 10^4$ ; 3,5 ГПа.*

**Ключові слова:** композиційні матеріали, композиційні гранули, термобаричний відпал, контактна взаємодія

*The method of optical and electron microscopy and X-ray analysis were used to study the interaction processes of the Ni–Al system in the temperature range of 1075 K to 1775 K at the pressures of  $1 \cdot 10^4$ ; 3,5 GPa.*

**Key words:** composite materials, composite granules, thermobaric annealing, contact interaction.

## Литература

1. Соколовская Е. М., Гузей Л. С. Физико-химия композиционных материалов. – М: МГУ, 1978. – 255 с.
2. Сайфуллин Р. С. Комбинированные электрохимические покрытия и материалы. – М.: 1983. – 187 с.
3. Вол А. Е. Строение и свойства металлических систем. – М.: Физматгиз, 1959. – Т. 1. – 755 с.
4. Неверов В. Н., Пименов В. И. Взаимодействие никеля с жидким алюминием / Физика и химия обработки материалов. – 1980. – № 4. – С. 68–70.
5. Иванов Л. И., Земсков В. С., Кубасов В. Н. Плавление, кристаллизация и фазообразование в невесомости. – М.: Наука, 1989. – 256 с.
6. Турчанин М. А., Белоконенко И. В., Агровал П. Г. Теплота образования жидких сплавов никеля с IV-а металлами / Расплавы. – 2001, № 3. – С. 53–60.

*Поступила 10.07.12*