

аппроксимирующие функции для МАК: без учета смазки –  $\mu(P) = 0,016 + 1,485/P - 15,782/P^2 + 57,885/P^3 - 49,101/P^4$ , с учетом смазки –  $\mu(P) = -0,003 + 2,203/P - 33,134/P^2 + 140,289/P^3 - 124,227/P^4$ . Погрешность между экспериментальными данными и аппроксимирующей функцией для модифицированного фторопласта составила менее 1% для всех вариантов контакта. Для МАК без учета смазки погрешность не превышает 1%, для случая с учетом смазки не превышает 2,5%.

В рамках работы выполнено моделирование фрикционного контакта современных антифрикционных полимерных материалов в рамках тестовых задач.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00903).*

#### **Список литературы**

1. Каменских А.А., Адамов А.А. Численное исследование сферического контактного узла с полимерной антифрикционной прослойкой // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2012. – №3. – С. 54-61.
2. Адамов А.А. Экспериментальное изучение механического поведения и трения полимерных антифрикционных материалов при давлениях до 60 МПа. // *Сб. докладов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*, г. Казань, 20-24 августа 2015 г. – С. 79-81.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ В ПРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ ИНВАРНОГО ТИПА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*А.С. ОЛЕНЕВА, Е.В. АБДУЛЬМЕНОВА, Н.С. ЛЮТЫЙ, О.Ю. ВАУЛИНА*

Томский политехнический университет

[Olenevaalex@gmail.com](mailto:Olenevaalex@gmail.com)

В настоящее время разработка сплавов с особыми тепловыми свойствами является важным и приоритетным направлением современного материаловедения. С прогрессивным развитием современных технологий новейших отраслей техники возрастает потребность в деталях из сплавов с заданными тепловыми свойствами, в том числе с минимальным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), к которым относятся инварные сплавы [1, 2]. Объектом исследования являются порошковые композиции инварного типа с варьированием содержания никеля от 30 до 40%.

Инварные композиции с разным содержанием никеля (от 30 до 40%) были исследованы на насыпную плотность. Образцы были поделены на две группы по режиму спекания: для 1 группы  $T_c = 1350$  °С, для 2 группы  $T_c = 1300$  °С. Типичные структуры спеченных образцов представлены на рисунке 1. Усадка больше для образцов при температуре спекания 1350 °С в среднем на 15 %.

В результате исследований образцов на пористость можно сделать вывод, что с увеличением температуры спекания с 1300 °С до 1350 °С, при одинаковом содержании никеля, происходит увеличение пористости образцов. Это может происходить за счет снятия упругих напряжений, возникших при прессовании или из-за фазовых превращений.

На структурах, рисунок 1, наблюдается типичная аустенитная структура с ГЦК-решеткой с большим количеством двойников. С увеличением содержания никеля увеличивается число двойников, которые в свою очередь могут негативно сказываться на готовом изделии и приводить к образованию микротрещин.

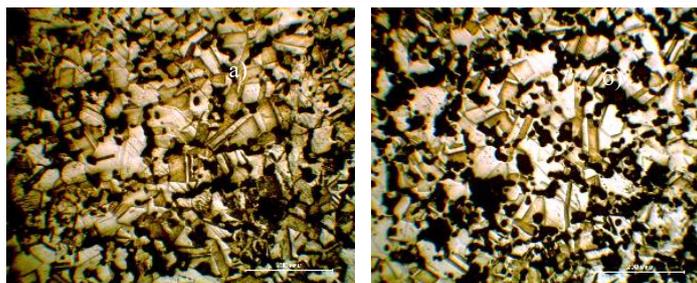


Рисунок 1 – Микроструктура травленных образцов: а) 30-1; б) 30-2.  
Обозначение образцов: первая цифра – содержание никеля (%), вторая – температура спекания (1-1350 °С, 2 - 1300°С)

Фрагменты рентгенограмм, спечённых образцов при температурах 1350°С и 1300°С, из смеси порошков железа и никеля, представлены на рисунке 2. Из рентгенограмм видно, что после спекания формируется структура инварного сплава состоящая из аустенитной  $\gamma$ -фазы с ГЦК структурой, характерной для инвара [1 - 3]. В некоторых образцах формируется ОЦК фаза с параметром решётки ( $2,8611 \cdot 10^{-10}$  м); ее интегральная интенсивность варьируется от 7 % до 18 %.

Образцы, прошедшие спекание при двух температурных режимах, были изучены на микротвёрдость по Виккерсу. С увеличением температуры, увеличивается микротвёрдость образцов, до содержания 35%. Из этого можно сделать вывод, что увеличение содержания никеля с 30% - 35% в порошковой смеси увеличивает микротвердость конечного образца, а при дальнейшем его увеличении с большой вероятностью будет уменьшаться за счет роста размеров и количества двойников. Так же можно отметить, что увеличение температуры спекания на 50 °С, увеличивает микротвёрдость образцов в среднем на 15HV.

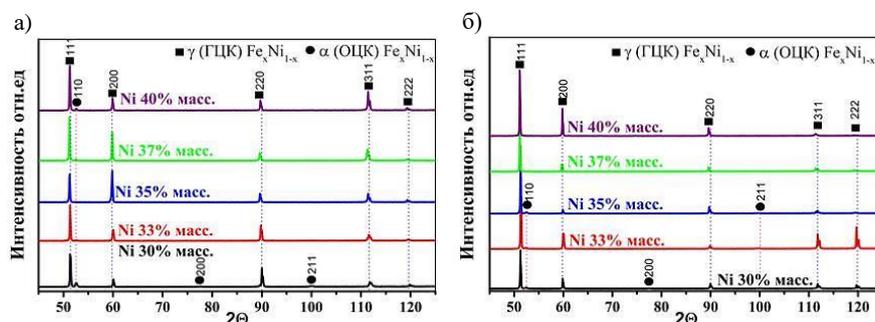


Рисунок 2 – Рентгенограммы образцов, спеченных при разных температурах: а) 1350°С; б) 1300°С

В заключении можно сказать, что варьирование количества никеля от 30 до 40% Ni на исследуемые характеристики не оказывает существенного влияния. Повышение температуры спекания повышает исследуемые свойства.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-48-700039 р\_а.*

#### Список использованных источников

1. Копцева Н.В., Голубчик Э.М., Ефимова Ю.Ю. и др. Особенности формирования комплекса физико-механических свойств высокопрочных инварных сплавов // Новые металлические материалы и процессы. 2014. №3. С.47-52.

2. Голубчик Э.М, Копцева Н.В, Чукин Д.М., Ефимова Ю.Ю и др. Возможности применения высокопрочных инварных сплавов нового поколения // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – том 1. – 2015. – с.342-345
3. J. Hidalgo, A. Jiménez-Morales, T. Barriere, J. C. Gelin & J. M. Torralba. Mechanical and functional properties of Invar alloy for  $\mu$ -MIM // Powder Metallurgy. – 2014. – vol 57. – №2. – p. 127–136.

## ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЯ КЕРАМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

*В.Д. ПАЙГИН, А.А. ЛЕОНОВ, Т.Р. АЛИШИН, О.С. ТОЛКАЧЁВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: vpaygin@mail.ru

**Введение.** Развитие современной науки и техники требует создания новых высокоэффективных материалов эксплуатация которых, возможна при температурах от 1200 до 2000 °С в условиях повышенной механической нагрузки. К таким материалам относится техническая керамика, обладающая высокими механическими характеристиками, термодинамической стабильностью, инертностью по отношению к воздействиям многих химически агрессивных сред и широким диапазоном изменения теплофизических свойств в зависимости от состава. Однако использование этих преимуществ не всегда возможно, в силу высокой хрупкости керамических материалов, обусловленной особенностями ионно-ковалентного типа межатомных связей. Одним из вариантов решения этой проблемы является создание керамоматричных композиционных материалов (ККМ), армированных дискретными или непрерывными волокнами. Вероятность разрушения ККМ в процессе нагружения высока существенно ниже, чем у её неармированных аналогов. Деформация в композиционных материалах проходит нелинейно, что сохраняет несущую способность. ККМ успешно применяются в авиационной и космической технике, двигателестроении, приборостроении, обрабатывающей и военной промышленности [1-2]. Перспективным матричным материалом для изготовления ККМ является частично стабилизированный диоксид циркония, а наполнителем - нановолокна оксида алюминия, что обусловлено их уникальными физико-механическими свойствами [3].

В настоящей работе проведено исследование динамики линейной усадки ККМ на основе диоксида циркония армированного нановолокнами оксида алюминия.

**Материал и методики экспериментов.** В качестве матричного материала был использован нанопорошок диоксида циркония частично стабилизированного 3 мол. % оксида иттрия (TZ-3YS, Tosoh Corp., Япония), в качестве наполнителя - нановолокна оксида алюминия (OCSiAl, Россия). Подготовку композиционных смесей с содержанием 1; 5 и 10 мас. %  $Al_2O_3$  осуществляли в этаноле, при помощи ультразвуковой ванны ГРАД 28-35 (Град-Технолоджи, Россия). Консолидацию порошковых смесей осуществляли методом электроимпульсного плазменного спекания на установке SPS-515S (SPS SYNTEX INC., Япония) в вакууме при температуре 1500 °С и давлении 40 МПа. Изменение линейных размеров керамического материала в процессе спекания регистрировалось встроенными средствами технологического оборудования. Плотность образцов была определена измерением массы и линейных размеров. Исследование микроструктуры ККМ проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM 7500FA (JEOL, Япония).

**Результаты исследования и их обсуждение.** Основные характеристики изготовленных образцов представлены в таблице.