

## ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертации Абеди Мохаммада «ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ИСКРОВОЕ  
ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ  
Cu-Cr, Ni-Al И  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ »,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Сущность порошковой металлургии в самом широком смысле слова заключается в переводе сыпучего тела в плотное, компактное и обладающее нужными физико-химическими, механическими и функциональными свойствами. Диссертационное исследование Абеди Мохаммада как раз посвящено разработке научных и методологических основ нового способа консолидации – высокоскоростное искровое плазменное спекание (ВИПС). Данный метод консолидации заключается в быстром нагреве порошкового тела постоянным током низкого напряжения (менее 10 В) и высокой силы ( $>450$  А) в импульсном режиме. Модельными сплавами, выбранными для оценки механизмов и условий уплотнения (консолидации), выступали псевдосплавы Cu-Cr (почти нерастворимы в твердом состоянии), реакционная система Ni-Al (образуют ряд интерметаллидов) и керамический композит  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiC}$ . Для выявления преимуществ метода ВИПС указанные материалы также спекали и по «традиционным» режимам искрового плазменного спекания (ИПС) (меньше пропускаемый электрический ток и скорость нагрева).

На примере псевдосплавов Cu-Cr показано, что в режиме ВИПС требуется меньше времени и температуры спекания для достижения высокоплотного состояния (98-99 %) по сравнению с ИПС. Получаемый материал (после ВИПС) имеет достаточно высокую твердость 5 ГПа и относительно небольшое удельное электросопротивление  $7,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, модуль Юнга около 240 ГПа. Изучено влияние плотности тока на деградацию конечной структуры Cu-Cr. Показано, что если плотность тока превышает  $482 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ , то микроструктура сплава приобретёт неоднородность. Абеди М. делается вывод, что метод ВИПС позволяет получать структурно и качественно сопоставимые с ИПС материалы, но с гораздо меньшими затратами энергии при консолидации.

На примере диффузионной пары Ni|Al определены диффузионные параметры роста промежуточных слоёв интерметаллидов, богатых алюминием,  $\text{NiAl}_3$  и  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  в условиях ИПС с пропусканием электрического тока через образец и с изоляцией образца от электрического тока за счёт покрытия внутренних стенок матрицы и контактных торцов пуансонов нитридом бора. Показано, что в режиме прямого пропускания электрического тока наблюдается ускорение диффузионных процессов, уменьшение энергии активации гетеродиффузии относительно режима с изоляцией электрического тока.

В работе установлено, что методом ВИПС с выдержкой 40 сек при температуре 1300 °С возможно получать тугоплавкую керамику  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  с относительной плотностью 99 %, твёрдостью около 20 ГПа и терциноустойкостью 7,5 МПа·√м. Диссертационное исследование позволило Абеди М. разработать регламент на изготовление режущего инструмента из композита 80 % масс.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 20 % масс. SiC для чистовой обработки поверхности изношенных валцов из высокопрочной стали, применяемых при подготовке глины-сырца для кирпичного производства. Инструмент прошёл успешные испытания в ООО «Керамобрикет М» (Северная Осетия, г. Моздок). Этот результат ярко подчёркивает практическую значимость работы.

Диссертационное исследование отличается громадным экспериментальным и теоретическим материалом. Однако работа не свободна от некоторых недостатков, которые можно разделить на две группы: замечания по оформлению и существу работы.

#### Проблемы оформления:

1. Автореферат содержит 30 страниц, использовано множество методик исследования, изучались свойства трёх групп консолидированных материалов. Для такого объёма данных явно не хватает какого-то обобщающего рисунка или схемы, показывающих режимы обработки – материал – основные свойства;
2. В таблице 1 на 9 стр. автореферата есть графа «Мощность», в которой эта мощность обозначается как «МА» или «Начальная». Совершенно не ясно, что это значит;
3. На стр. 10 автореферата с ошибкой написана длина волны кобальтового  $K_\alpha$  излучения (0,22909 нм, а должно быть 0,179... нм);
4. На стр. 15 автореферата дана ссылка на рис. 5 г, хотя рис. 5 имеет всего три позиции а, б, в;
5. На стр. 18 автореферата предложение «На рисунке 4 видно, что материал Cu/Cr состоит из наноструктурированных зёрен Cu/Cr,...» повторяется 2 раза;
6. На стр. 25 автореферата в последнем предложении по ошибке написано «влияние количества SiC на физико-химические свойства SiC». Очевидно, что должно быть написано «влияние количества SiC на физико-химические свойства  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ».

#### Замечания по существу:

1. В таблице 1 автореферата представлено 12 различных режимов консолидации методом ВИПС псевдосплавов Cu-Cr, хотя далее по работе встречаются и описаны экспериментальные данные, полученные после 3-4 режимов спекания. Не совсем понятно, зачем в таком случае в таблице 1 показывать все режимы?

2. На рис. 4 автореферата показана микроструктура псевдосплавов Cu-Cr после ВИПС двух смесей порошков Cu и Cr механически активированных по разным режимам в разных смесителях. Из рис. 4 видно, что размеры структурных составляющих сплавов отличаются на несколько порядков. Было бы правильно дать описание наблюдаемой структуры в привязке к размерам частиц исходных активированных порошков Cu-Cr;

3. Смесью порошков Cu и Cr подвергали механоактивации в стальных барабанах с разной степенью энергетического воздействия (шаровая мельницы Wise Mix BLM-2 BLM-6 – скорость вращения барабана 175 об/мин и Активатор-2S – скорость вращения планетарного диска 694 об/мин). Далее в работе показано, что компактный образец, изготовленный из смеси, обработанной в Активатор-2S, имеет удельное электрическое сопротивление приблизительно на 20 % больше, чем у образца, полученного из смеси, активированной в Wise Mix BLM-2 BLM-6. С чем это связано? Определяли ли концентрацию намотого Fe в активированных смесях?

4. В работе прослеживается идея объяснения ускорения диффузии, процессов консолидации и массопереноса в ходе ВИПС или ИПС за счёт позитивного влияния электрического поля, создаваемого импульсным постоянным током. Хотя из исследования не совсем ясно в чём собственно проявляется это влияние. Известно, что протекание электрического тока вызывает разогрев проводника. Не является ли ускоряющее действие тока на кинетику спекания и диффузию следствием простого локального перегрева порошковых смесей относительно заданной температуры спекания, контролируемой термопарой, приставленной к стенке графитовой пресс-формы?

Однако, сделанные замечания совершенно не снижают научной и практической значимости диссертационной работы. Диссертационное исследование является самостоятельной научно квалификационной работой.

По материалам диссертации имеется 4 публикаций в журналах ВАК и включенных в базы данных Scopus, Web of Science и 1 тезис доклада в сборнике трудов международной конференции.

Диссертационная работа Абеди М. в полной мере отвечает всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, установленным «Положениями о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а ее автор, Абеди Мохаммад, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Инженер кафедры «Физика металлов  
и материаловедение»  
Тульского государственного  
университета, к.т.н.



Юдин Сергей Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

300012, Тульская область, г. Тула, проспект Ленина, д. 92

Тел.: +7(4872)73-44-44, e-mail: [info@tsu.tula.ru](mailto:info@tsu.tula.ru)

Специальность 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Заверение подписи от организации

Я, нижеподписавшийся, даю  
согласие на включение моих  
персональных данных в документы,  
связанные с защитой  
диссертационной работы Абеди  
Мохаммада, и их дальнейшую  
обработку.

 С.Н. Юдин

