

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОШКОВ.

В.Ю. Гольцев¹, А.В. Осинцев¹, Е.Л. Стрижаков², С.В. Нескоромный²,
С.О. Агеев^{2,5}, О.О. Кузнечик³, А.Н. Чумаков⁴, И.С. Никончук⁴, Е.Г. Григорьев⁵

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

³Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск

⁴Институт физики имени Б.И. СТЕПАНОВА НАН Беларуси, Минск

⁵Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова
РАН, Московская обл., Черноголовка

eugengrig@mail.ru

Рассмотрены электротепловые процессы на контактах между частицами порошка и в макромасштабе всего образца при высоковольтной консолидации порошковых материалов. Приведены результаты математического моделирования процессов динамического закрытия межчастичных пор при высоковольтной консолидации. Разработан экспериментальный комплекс для регистрации параметров высоковольтного импульса тока и теплового излучения порошкового образца в процессе высоковольтной консолидации.

Ключевые слова: высоковольтная консолидация порошковых материалов, электротепловые процессы, кумулятивный режим закрытия межчастичных пор.

Рассмотрены основные особенности метода высоковольтной консолидации порошковых материалов и обусловленные ими преимущества и ограничения данного метода. Кратковременность высокотемпературного энергосилового воздействия на порошок в процессе высоковольтной консолидации позволяет сохранить в консолидированном компактном материале структурно-фазовое состояние исходного порошкового материала. Особенностью данного метода является концентрация высокой плотности выделяемой энергии в области контактов между частицами порошка. При этом исходное состояние поверхности частиц порошка (толщина и структура окисных пленок, наличие посторонних примесей и т. п.), форма частиц порошка и их размеры существенно влияют на закономерности процессов высоковольтной консолидации. Наряду с характеристиками порошка, определяющими факторами являются: скорость ввода энергии электромагнитного поля в порошковый материал, величина и характер механического давления, воздействующего на порошковую заготовку в процессе высоковольтной консолидации. Высокая плотность энергии в зонах контактов частиц приводит к локальному изменению агрегатного состояния вещества порошка в этих зонах. Наряду с неоднородностью нагрева порошка в межчастичных контактах возможно макроскопически неоднородное распределение плотности тока в объеме консолидируемого образца. Структура порошкового материала при высоковольтной консолидации формируется под влиянием разно-

масштабных процессов, протекающих на межчастичных контактах, в частицах порошка, и в макро-объеме всего образца.

Проведенными исследованиями высоковольтной консолидации порошковых материалов выявлены неустойчивые режимы, приводящие к формированию неоднородных свойств получаемых образцов или к разрушению исходных порошковых заготовок и технологической пресс-оснастки. Определяющим технологическим фактором, приводящим к неустойчивым режимам высоковольтной консолидации порошковых материалов, являются параметры высоковольтного импульса тока. Регистрация параметров высоковольтного импульса тока и интенсивности теплового излучения консолидируемых порошковых материалов осуществлялась с помощью разработанного авторами измерительного комплекса. Данный комплекс включает: пояс Роговского, регистрирующий параметры высоковольтного импульса тока; фотодиодные датчики, регистрирующие интенсивность теплового излучения, передаваемого по оптическому волноводу от консолидируемого порошка; систему синхронизации измерительного комплекса. Анализ теплового излучения с поверхности порошкового образца в процессе высоковольтной консолидации проводится в видимом диапазоне излучения, в пределах от $\lambda_{\text{г}}=650$ нм до $\lambda_{\text{г}}=950$ нм. В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлены закономерности физических процессов, протекающих при высоковольтной консолидации порошков, и механизмы, приводящие к формированию неустойчивых режимов консолидации. Механизм, приводящий к неустойчивым режимам консолидации, связан с волновым характером процесса уплотнения порошкового материала. Неустойчивый режим консолидации возникает, когда на фронте волны уплотнения в порошковом материале межчастичные поры захлопываются с нарастанием скорости в момент схлопывания – «кумулятивный режим» [1]. При этом режиме, как правило, формируется неоднородная структура консолидированного материала. Представлены результаты расчетов динамики закрытия (коллапса) межчастичных пор в уплотняемом материале на основе разработанной математической модели. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными результатами высоковольтной консолидации ряда порошковых материалов.

Представлены результаты исследования макро- и микроструктуры консолидированных материалов и механических испытаний полученных образцов. Испытания при комнатной температуре на сжатие в исследованном диапазоне показали, что все консолидированные образцы выдерживают сжимающее напряжение без разрушения [1]. Высоковольтная консолидация способствует поддержанию исходной мелкозернистой структуры и практически полному отсутствию пористости в консолидированных материалах.

Литература

1. Grigoryev E., et al. // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 53, 1552–1563 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02465-x>.