

УДК 004.942.001.57

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ  
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ**

Лю Ханьлэй, Т.Р.Алишин

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Э.С. Двилис

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [hanhanliu69@gmail.com](mailto:hanhanliu69@gmail.com)

**SIMULATION OF THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FIELDS IN THE PROCESS OF  
ELECTRIC PULSED PLASMA SINTERING**

Liu Hanlei, T.R. Alishin

Scientific Supervisor: Dr. E.S. Dvilis

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [hanhanliu69@gmail.com](mailto:hanhanliu69@gmail.com)

***Abstract.** This research work is devoted to modeling the SPS process in the program for finite element modeling COMSOL Multiphysics. As part of the study, the influence of the properties of sintered powders and the geometric parameters of the mold on the distribution of thermal fields in the sintering zone was evaluated.*

**Введение.** Электроимпульсное плазменное спекание (SPS) используют в производстве широкого спектра изделий из различных материалов. Одним из главных преимуществ SPS перед традиционными технологиями спекания является высокая скорость процесса, обусловленная нагревом пресс-формы с порошком за счет пропускания через нее импульсного тока. Однако полностью достоверного описания всех физических процессов, происходящих при SPS, до сих пор не существует, а исследования проводятся по критериям достижения требуемых характеристик спечённого материала. Одним из основных параметров воздействия при SPS является температура, существенные перепады и неравномерное распределение полей которой по объёму консолидируемого образца могут привести к неравномерному распределению свойств и подлежат минимизации путём подбора оптимального сочетания параметров спекания. Практическая реализация таких оптимизационных исследований ограничена техническими трудностями в измерении температуры в различных областях консолидируемого образца, находящегося в закрытой жёсткой пресс-форме. Вариантом решения указанной проблемы является конечно-элементное моделирование процесса SPS. Верификация модели может быть проведена по значениям температуры на доступных для контроля областях оснастки, а полученные поля распределения температуры позволят ограничить диапазон экспериментального поиска оптимальных режимов SPS.

**Целью данной работы** является изучение влияния свойств порошка и геометрических параметров прессовой оснастки на характер и равномерность распределения температурных полей в зоне спекания в процессе SPS методами конечно-элементного моделирования.

**Экспериментальная часть.** В процессе исследования использовали материалы с различными тепло- и электрофизическими свойствами: медь и диоксид циркония. Параметры электропроводности,

теплопроводности и теплоемкости образцов были взяты из литературных данных [1, 2].

Моделирование распределения температурных полей в зоне спекания проводили с помощью программы конечно-элементного моделирования COMSOL Multiphysics. 3D модель пресс-формы построили на основе размеров реальной оснастки, рисунок 1 а.

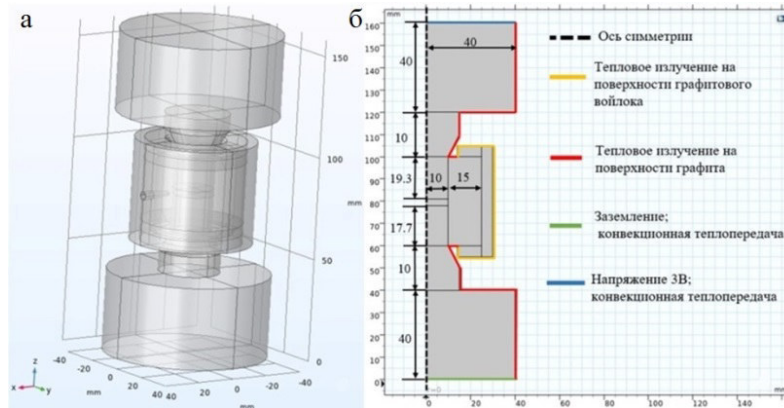


Рис. 1. а - 3D модель пресс-формы с подставками, б - схема осесимметричных граничных условий

Тепловые условия модели включают в себя тепловое излучение с поверхности оснастки и конвективный теплообмен с системой водяного охлаждения. Ввод электрического напряжения осуществляется сверху, заземление снизу в соответствии со схемой, рисунок 1 б.

**Результаты.** Для изучения влияния размера пресс-формы на равномерность распределения температурных полей в образце использовали матрицы с различной толщиной стенки (12,5 мм – 25 мм). Глубина отверстия для измерения температуры во всех экспериментах была постоянной и равнялась 10 мм. Максимальная и минимальная температура образцов из меди и диоксида циркония и температура измерительного отверстия в зависимости от толщины матрицы представлены на рисунке 2. Увеличение толщины стенки матрицы приводит к снижению температуры образцов и увеличению разницы между реальной и измеряемой температурой. Толщина матрицы не оказывает существенного влияния на величину температурного перепада в медном образце, который на всем изученном диапазоне значений остается равным 7 °С. В случае диоксида циркония увеличение толщины матрицы приводит к росту температурного перепада с 16 до 25 °С на изученном диапазоне значений.

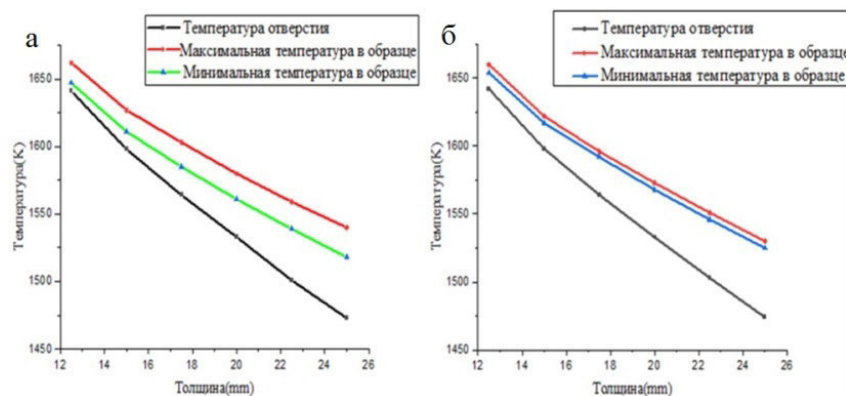


Рис. 2. Максимальная и минимальная температура образца и температура измерительного отверстия в зависимости от толщины матрицы: а - диоксид циркония, б - медь

Кроме того, оценивали влияние отверстия для измерения температуры (измерительное отверстие) на равномерность распределения температурных полей в образцах из меди и диоксида циркония (рисунок 3). На части образца, находящейся напротив измерительного отверстия, наблюдается область с минимальной температурой, однако этот эффект уменьшается с увеличением толщины стенки матрицы, и распределение температуры в образцах становится более равномерным в диаметральном направлении.

В случае с диоксидом циркония наблюдается температурный градиент по высоте образца, что, предположительно, связано с использованием пуансонов различной длины.

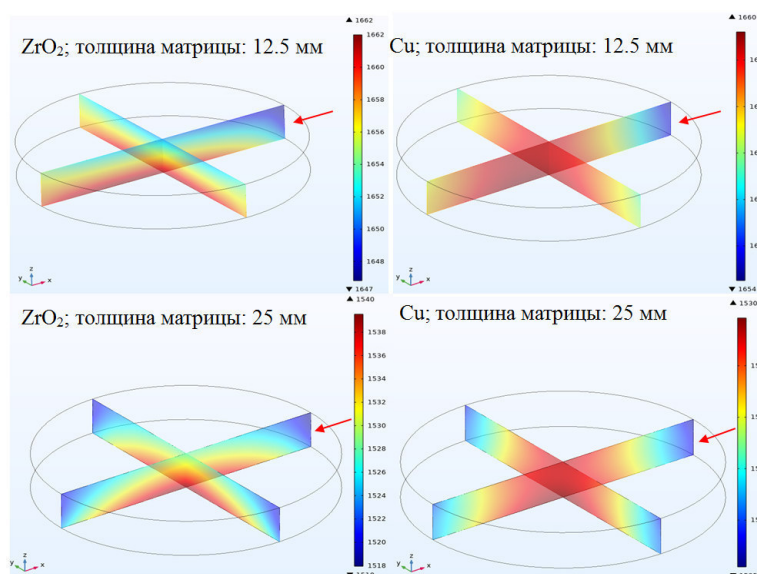


Рис. 3. Распределение температурных полей в образцах из меди и диоксида циркония при спекании в матрицах с различной толщиной стенки, стрелка указывает на положение измерительного отверстия относительно образца

**Заключение.** Увеличение толщины стенки матрицы пресс-формы, на изученном диапазоне значений, приводит к снижению средней температуры образцов из меди и диоксида циркония, и увеличению разницы между реальной температурой образца и измеряемой. Кроме того, с увеличением толщины стенки матрицы происходит рост температурного перепада в образцах из диоксида циркония, для медных образцов данный параметр остается постоянным на всем изученном диапазоне значений. Наличие в пресс-форме отверстия для измерения температуры отрицательно влияет на равномерность распределения температурных полей в образцах из обоих исследуемых материалов, с увеличением размеров матрицы распределение температурных полей становится более равномерным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vanmeensel K. Modelling of the temperature distribution during field assisted sintering // Acta Materialia. – 2005. – V. 52, № 16. – P. 4379-4388
2. Anselmi-Tamburini U. Fundamental investigations on the spark plasma sintering/synthesis process: II. Modeling of current and temperature distributions // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – V. 394. – P. 139-148