

УДК 51-73:004.942

П.А. Ковалев, Е.М. Веселова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ КЕРАМИКИ Al_2O_3 -TiC
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА**

В работе представлены результаты компьютерного моделирования воздействия движущегося лазерного луча на образец оксикарбидной керамики на основе композиции Al_2O_3 -TiC. Построена мультифизическая модель в среде COMSOL, позволяющая оценивать изменение температурного поля внутри и на поверхности образца и тепловое расширение образца вследствие воздействия на него лазерного излучения.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, COMSOL Multiphysics, мультифизическая модель, керамические материалы, лазерный луч, изменение температуры, тепловое расширение.

**MODELING THERMAL EXPANSION OF THE CERAMIC Al_2O_3 -TiC
UNDER THE INFLUENCE OF THE LASER BEAM**

The paper presents the results of a computer simulation of moving laser beam influence on the sample of oxycarbide Al_2O_3 -TiC ceramics. A COMSOL multiphysics model has been developed. It allows to estimate the variation of the temperature field inside and on the surface of the specimen as well as the thermal expansion of the sample caused by its exposure to laser radiation.

Key words: computer modeling, COMSOL Multiphysics, multiphysics model, ceramic materials, laser beam, temperature change, thermal expansion.

Введение

Широкое применение керамических материалов в качестве конструкционных объясняет повышенный интерес к их исследованию в экстремальных условиях эксплуатации. К таким условиям можно отнести воздействие на материал лазерного излучения. Способность керамики сохранять функциональные свойства в условиях высоких температур определяет повышенный интерес к их изучению в различных областях лазерных технологий. В большинстве процессов лазерных технологий используется термическое воздействие излучения, которое можно сфокусировать в лазерный луч нужного диаметра. В настоящее время на первый план выступает математическое и компьютерное моделирование исследуемых процессов, что позволяет избежать рутинных дорогостоящих экспериментов. Мощным инструментом исследования различных физических процессов является среда COMSOL Multiphysics, отличительная особенность которой – возможность создавать «мультифизические» модели, одновременно обрабатывающие связанные физические явления, наглядная визуализация результатов моделирования [1].

Описание этапов моделирования

В данной работе приведены результаты компьютерного моделирования теплового воздействия лазерного луча на керамический образец на основе композиции $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$. Ранее было проведено моделирование изменения температурного поля образца с применением инструментальных возможностей пакета COMSOL Multiphysics. При исследовании в среде COMSOL использовался модуль теплопроводности в твердых телах – Heat Transfer in Solids (ht).

Цель работы – моделирование теплового расширения оксидной керамики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ под воздействием движущегося лазерного луча, создание мультифизической модели данного процесса в среде COMSOL.

Для компьютерного моделирования в ПО COMSOL Multiphysics необходимо в «Построителе моделей» выполнить ряд шагов: определение размерности модели; выбор типа исследования; создание геометрии; выбор материалов и задание их свойств; задание глобальных и локальных переменных; генерация сетки; проведение исследования; отображение и анализ результатов [1-2].

В работе была построена трехмерная модель нестационарного процесса (Time Dependent). Исследовался образец из оксикарбидной керамики на основе композиции $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, геометрически представляющий собой цилиндрическую пластину радиусом $r_wafer = 0,0254$ м и толщиной $thick = 275$ микрон, или $2,75 \cdot 10^{-4}$ м (рис. 1).

Далее были заданы основные характеристики исследуемого керамического образца – глобальные параметры модели. Пластина, облучаемая лазерным лучом, вращается, что задается параметрами: скорость вращения $rot_speed = 1$ Гц и угловая скорость $ang_vel = 6,2832$ Гц, а также указывается $emissivity = 0,8$ – излучательная способность поверхности образца.

Остальные параметры описывают воздействующий на образец лазерный луч: заданы мощность лазера $laser_pow = 10$ Вт, радиус пучка лазера $r_spot = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, время для перемещения лазера вперед и обратно $period = 10$ с.

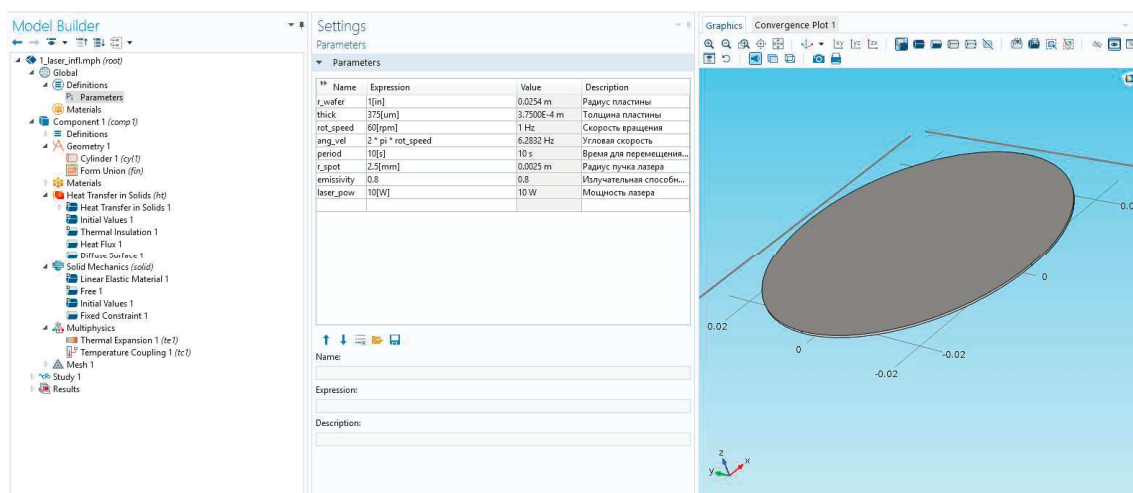


Рис. 1. Геометрия исследуемого образца керамики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ и глобальные параметры модели.

Для моделирования лазерного луча необходимо задать локальные функции, характеризующие его физические параметры. Профиль нагрева лазера позволяет описать встроенная в COMSOL функция гауссова импульса, имеющая два параметра – $location$ (начальное положение по оси x) и $standard\ deviation$ (стандартное отклонение), которые в модели заданы так: $location = 0$, а $standard\ deviation =$ трети радиуса пучка лазера, т.е. $r_spot/3$.

Таким образом, радиус пучка лазера будет равен трем стандартным отклонениям построенного нами гауссова импульса.

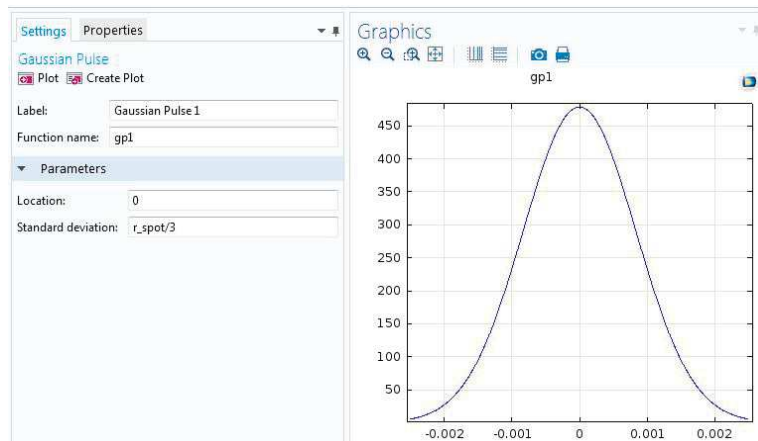


Рис. 2. Функция гауссова импульса.

Далее задаем локальную функцию Waveform (осциллограмма) треугольной формы. Координатный центр пучка лазера будет перемещаться по траектории, заданной данной функцией, что позволит нам отслеживать его положение вдоль оси x во времени. Для данной функции необходимо задать параметры: угловая частота, фаза, амплитуда.

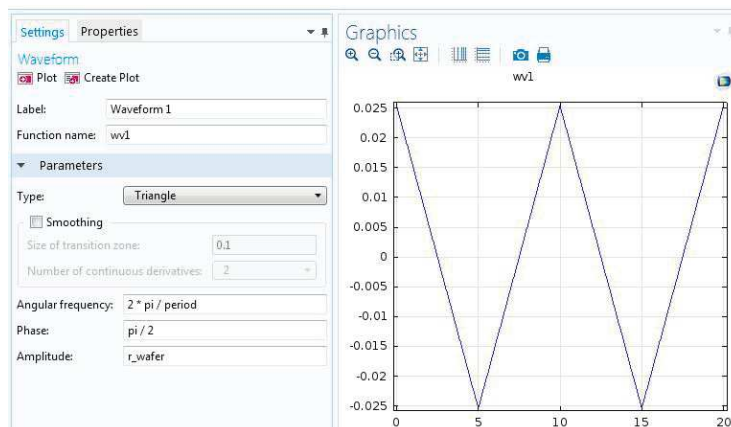


Рис. 3. Функция *Waveform*.

Физический параметр, описывающий тепловую нагрузку лазера на каждую точку поверхности пластины, задаем как функцию, которая определяется как количество мощности лазера, приходящееся на квадратный метр поверхности.

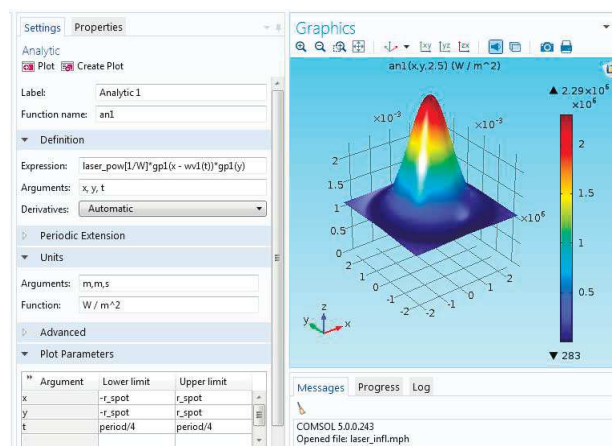


Рис. 4. Аналитическая функция тепловой нагрузки лазера.

Для исследования изменения температуры использовался модуль теплопроводности в твердых телах – Heat Transfer in Solids (ht), а для исследования теплового расширения и его влияния на изменение структуры модули – Solid Mechanics (solid), Multiphysics: Thermal Expansion.

В разделе Translational Motion модуля Heat Transfer in Solids укажем вектор скорости поступательного движения пластины в области уравнения теплопереноса.



Рис. 5. Перечень используемых модулей.

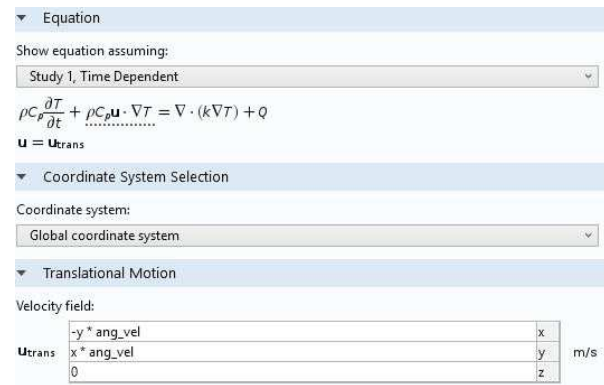


Рис. 6. Задание параметров поступательного движения пластины.

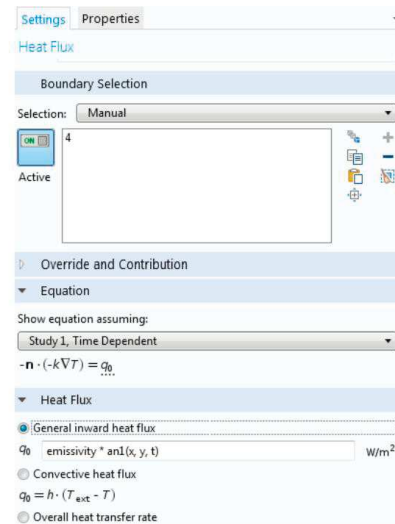
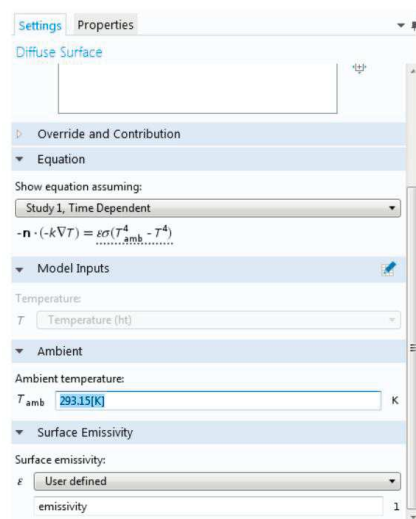


Рис. 7. Задание излучательной способности пластины (слева) и теплового потока q_0 (справа)

Как видно из рис. 7, тепловой поток задается как произведение функции тепловой нагрузки лазера на излучательную способность пластины (в данном случае предполагается, что излучательная способность пластины равна поглощающей).

В основе вычислений среды COMSOL лежат передовые численные методы. В данной модели вычисление выполняется методом конечных элементов, для которого необходимо задать сетку разбиения образца. В модели была выбрана сетка *triangular* – трехгранная, размер – *fine* (рис. 8).

Отображение результатов моделирования

После задания основных характеристик модели можно проводить исследование керамического образца. Изменение температурного поля образца в результате воздействия лазерного луча во временном интервале от 0 до 60 сек. и с шагом 0,1 представлено на рис. 9.

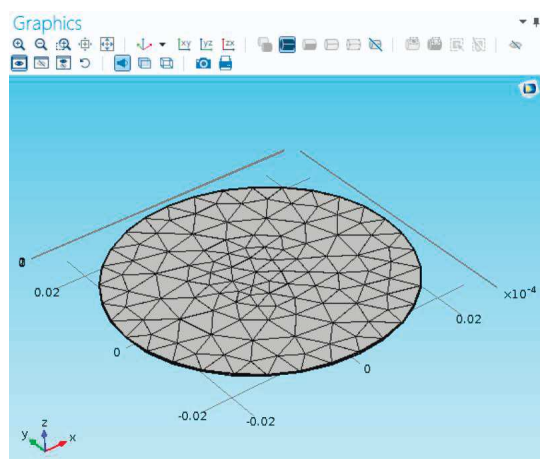


Рис. 8. Генерация сетки.

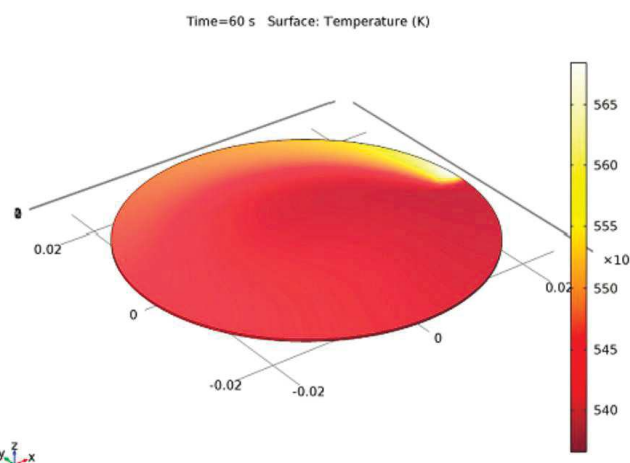


Рис. 9. Изменение температуры керамики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ (K).

На рис. 10 показано распределение напряжения фон Мизеса в керамической пластине $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$. Пластина деформируется посредством теплового расширения. Как видно из рисунка, наибольшее напряжение прикладывается в точках непосредственного воздействия лазерного пучка.

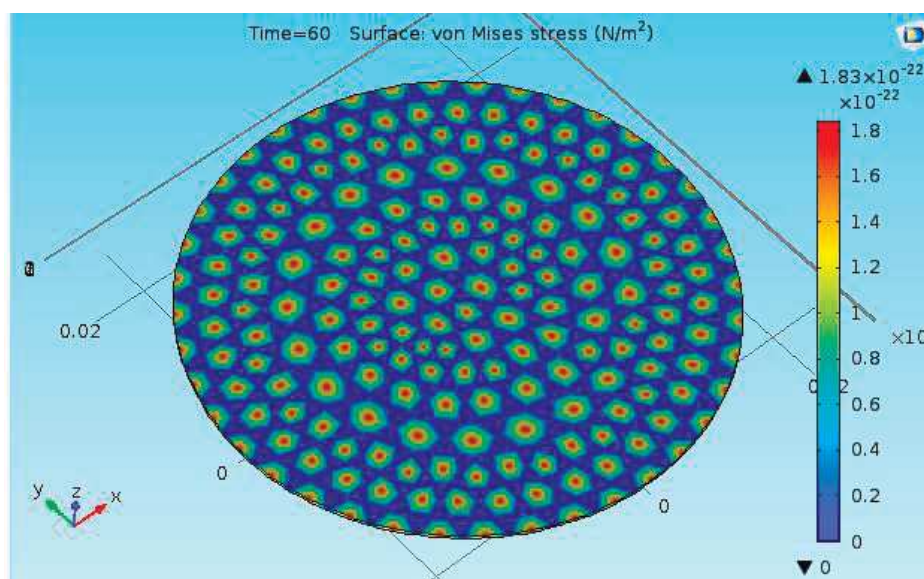


Рис. 10. Напряжение фон Мизеса в керамической пластине $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$.

Заключение

Таким образом, в результате компьютерного моделирования в среде COMSOL Multiphysics была построена мультифизическая модель воздействия движущегося лазерного луча на вращающийся цилиндрический образец керамики на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$. Исследовано тепловое воздействие лазерного луча на образец и тепловое расширение вследствие этого воздействия.

1. Введение в COMSOL Multiphysics – режим доступа www.comsol.ru.

2. Красников, Г.Е., Нагорнов, О.В., Старостин, Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета COMSOL Multiphysics. Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.