

значения напряжений в каждой точке поверхности стекла, наименьшее значение регистрируемых напряжений составило 2 МПа.

Литература

1. Оптические свойства кристаллов / А.Ф. Константинова [и др]. – Мн.: Наука и техника. – 1995. – С88–94.
2. Миндлин, Р. Изучение напряжений методом фотоупругости / Р.Мидлин // УФН. – 1940. – Т. 23. – № 1. – С.16–66.
3. Никоноров, Н.В. Оптическое материаловедение: основы прочности оптического стекла / Н.В. Никоноров, С.К. Евстропьев. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2009. – 102 с.

С.В. Шалупаев¹, П.Н. Богданович², Ю.В. Никитюк¹,
А.А. Середа¹, Д.А. Близнац²

¹УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Беларусь,

²УО «Белорусский государственный университет транспорта»,
Беларусь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Одним из наиболее эффективных методов высокоточного разделения хрупких неметаллических материалов является управляемое лазерное термораскалывание, отличительная особенность которого заключается в том, что разделение материала на части заданной формы происходит вследствие образования микротрещины, формируемой в результате поверхностного нагрева материала лазерным излучением и последующего охлаждения зоны нагрева хладагентом.

Для выяснения механизма формирования лазерно-индуцированной трещины, а также для разработки новых эффективных схем лазерного разделения хрупких неметаллических материалов и оптимизации технологических режимов обработки, используются теоретические расчеты температурных полей и полей упругих напряжений, формируемых в обрабатываемых изделиях. На

точность получаемых теоретических расчетов существенно влияет учет зависимости теплофизических свойств материала от температуры. Так как в процессе лазерного термораскалывания температура хрупких неметаллических материалов изменяется в достаточно широких пределах, то игнорирование температурных зависимостей для теплофизических характеристик материалов может обусловить заметные погрешности при определении рабочих режимов.

В работах [1-2] получены аналитические решения, которые удобны для проведения инженерных расчетов, и на основе которых выявлен ряд закономерностей лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов и установлена взаимосвязь между параметрами, оказывающими существенное влияние на процесс термораскалывания. Однако использование этих методов при анализе трехмерных температурных напряжений, формируемых в материале при лазерном термораскалывании, сопряжено со значительными трудностями, поэтому исследователям приходится ограничиваться двумерной постановкой задачи. Кроме того, все результаты в данных работах были получены при решении линейного дифференциального уравнения теплопроводности, в котором теплофизические коэффициенты принимались независимыми от температуры.

В работе [3] выполнено трехмерное моделирование процессов лазерного разделения хрупких неметаллических материалов с использованием численных методов, а именно метода конечных элементов. Для оценки погрешности, обусловленной применением выбранной модели конечных элементов, было выполнено сопоставление с точным аналитическим решением [1] неоднородного линейного уравнения теплопроводности. Полученные результаты верификации численного моделирования позволяют сделать вывод о том, что используемая конечно элементная модель обладает сходимостью к точному решению при уменьшении размеров элементов. При этом погрешность дискретизации составляет порядка 2-3,5 %.

Следует отметить, что сопоставление результатов численного моделирования с аналитическими решениями недостаточно для проверки точности полученных результатов. Более объективным является сравнение результатов численного моделирования с данными полученными при экспериментальных исследованиях. В данной работе выполнено сопоставление тепловизионных измерений процесса лазерного термораскалывания силикатных стекол с

расчетными значениями температур полученными при численном моделировании. Также проведен сравнительный анализ расчетных значений температур без учета зависимости теплофизических свойств материала от температуры и с их учетом.

Для исследования были выбраны пластины силикатного стекла вертикальной вытяжки размером 40x20x3 мм. Измерение температуры производилось при помощи тепловизионного устройства IR Snap Shot, диапазон измерения которого составляет от 0 до 370°C с погрешностью $\pm 3^\circ\text{C}$. Тепловизор был установлен на штативе под углом к горизонту в 60° , и фокусное расстояние составляло ~ 600 мм. Лазерный луч формировался на поверхности материала в виде круга радиусом 1,5 мм, который перемещался вдоль поверхности со скоростью 10 мм/с. На рисунке 1 представлена термограмма поверхности материала при воздействии лазерного пучка мощностью излучения 7,5 Вт. Числовые значения термограммы были экспортированы в Mathcad и построено распределение температуры на поверхности образца, представленное на рисунке 2.

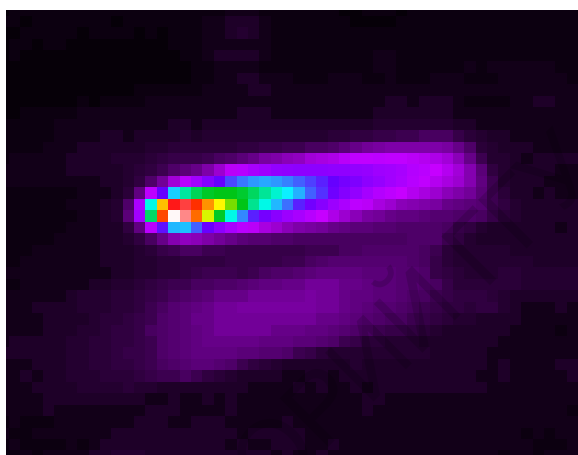


Рисунок 1 – Термограмма поверхности материала при воздействии лазерного пучка мощностью излучения 7,5 Вт

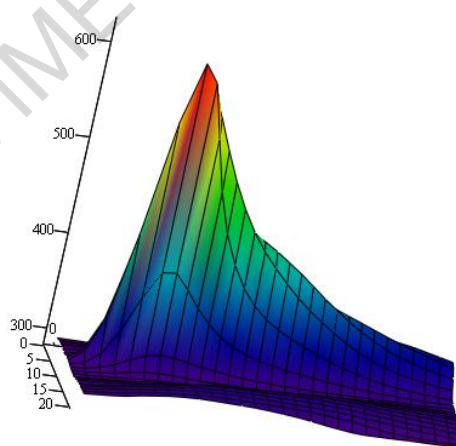


Рисунок 2 – Распределение температуры (К) на поверхности образца в области воздействия лазерного луча

Видно, что в области воздействия лазерного луча происходит интенсивный нагрев поверхности материала до температуры 350°C . За лазерным пучком тепло передается в близлежащие слои материала, что снижает температуру на поверхности материала. За лазерным пучком образуется так называемый тепловой шлейф.

Выполнен численный расчет, с использованием метода конечных элементов, температурных полей в материале при указанных выше

параметрах обработки. При этом расчет был выполнен как без учета зависимости теплофизических свойств материала, так и с их учетом. Теплофизические свойства материала представлены в таблице 1 [4].

Таблица 1 – Теплофизические свойства силикатного стекла

Свойство	Без учета температурной зависимости	С учетом температурной зависимости
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,88 при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	линейно изменяется от 0,88 при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 1,7 при $t=600\text{ }^{\circ}\text{C}$
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	860 при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	линейно изменяется от 860 при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 1150 при $t=600\text{ }^{\circ}\text{C}$
Плотность, кг/м ³	2450	2450

На рисунке 3 представлены расчетные температурные поля на поверхности материала полученные при лазерном нагреве с учетом температурной зависимости теплофизических свойств стекла. На рисунке 4 представлен расчетный график зависимости температуры на поверхности материала вдоль линии обработки.

Как видно из рисунков 3 и 4 распределение температур на поверхности материала аналогично термограмме представленной на рисунках 1 и 2. По результатам расчетов максимальное значение температуры на поверхности материала составляет $371\text{ }^{\circ}\text{C}$ при мощности излучения 7,5 Вт, что отличается от результатов тепловизионных измерений на 6 %. При этом если не учитывать температурную зависимость теплофизических свойств стекла, то это значения составляет $422\text{ }^{\circ}\text{C}$, что уже существенно отличается от экспериментальных значений на 20,5 %.

Сопоставление результатов численного моделирования процесса лазерного термораскалывания силикатных стекол с тепловизионными измерениями показывают, что экспериментальные и расчетные значения температур в материале, с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры, находятся в хорошем соответствии. Таким образом, для получения результатов сопоставимых с экспериментальными значениями необходимо учитывать зависимость теплофизических свойств материала от температуры, тогда численное моделирование можно использовать для разработки новых эффективных схем лазерного разделения

хрупких неметаллических материалов и оптимизации технологических режимов разделения.

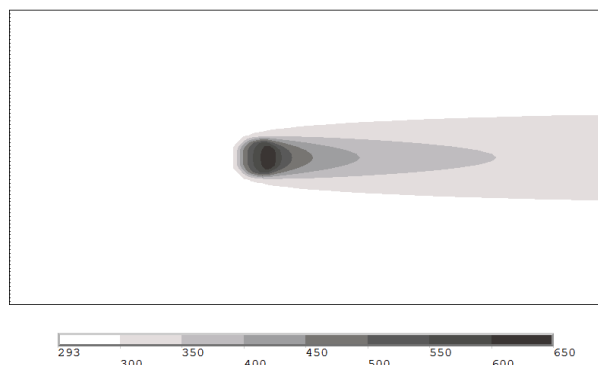


Рисунок 3 – Расчетные поля температур (К) на поверхности материала при мощности лазерного пучка 7,5 Вт

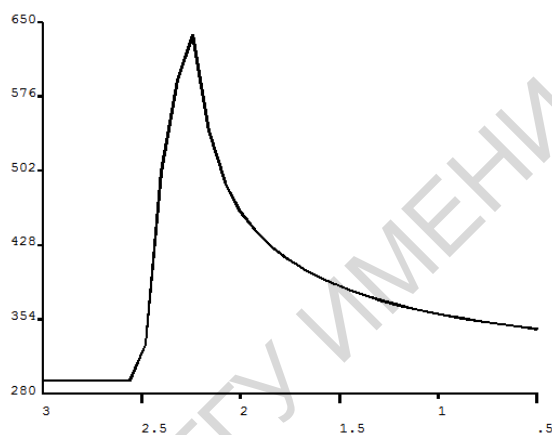


Рисунок 4 – График зависимости расчетных значений температур (К) вдоль линии обработки материала

Литература

1. Шалупаев, С.В. Термоупругие поля, формируемые в твердых телах световыми и звуковыми потоками: дис. ... канд. физ.-матем. наук: 01.04.05 / С.В. Шалупаев. – Минск, 1987. – 157 с.
2. Термоупругие поля в твердых телах при их обработке лазерными пучками специальной геометрии / Б.В. Бокуть [и др.]. – Минск: Институт физики АН БССР 1987. – 59 с. – (Препринт / Институт физики АН БССР; № 487).
3. Никитюк, Ю.В. Физические закономерности лазерного термораскалывания силикатных стекол и алюмооксидной керамики: дис. ... канд. физ.-матем. наук: 01.04.21 / Ю.В. Никитюк. – Минск, 2009. – 166 с.
4. Стекло / Апен А.А. [и др.]; под общ. ред. Н.М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1973. – 487 с.