

ISSN 1607-9922

МАТЕРИАЛЫ ТЕХНОЛОГИИ ИНСТРУМЕНТЫ

Том 10 • № 2 • 2005



ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.373.826

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

С. В. ШАЛУПАЕВ*, В. Е. ГАЙШУН, А. В. СЕМЧЕНКО, Ю. В. НИКИТЮК

УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», ул. Советская 104, 246699, г. Гомель, Беларусь

Приведены результаты исследований процесса лазерного термораскалывания тонких стеклянных пластин, полученных при использовании коллоидного варианта золь-гель метода. Проведен анализ термоупругих полей, формируемых лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм при лазерной обработке тонких гель-стекол.

Введение

В настоящее время широкое распространение находят нетрадиционные технологии синтеза материалов с особыми свойствами. Одной из таких технологий является золь-гель метод синтеза кварцевых стекол. Неоспоримыми преимуществами этого метода является экономичность, экологичность, возможность энерго- и ресурсосбережения. Используя золь-гель метод, можно синтезировать стекла, как особо чистые, так и активированные различными элементами, и обладающие такими привлекательными свойствами плавленых кварцевых стекол, как высокая термо- и химическая стойкость, высокая оптическая однородность и прозрачность. Гель-стекла имеют большие потенциальные возможности практического применения (в качестве активных и пассивных светофильтров, заготовок для вытяжки оптического волокна, люминофоров и др.) [1–2].

В связи с этим представляется актуальным исследование эффективных методов обработки гель-стекол. В силу особенностей их свойств оптимальным вариантом является использование лазерных методов обработки излучением с длиной волны 10,6 мкм, которые уже нашли широкое применение для обработки различных видов кварцевых стекол [3–4] и других хрупких неметаллических материалов [5–8].

Одним из наиболее эффективных методов высокоточной лазерной обработки хрупких неметаллических материалов является управляемое лазерное термораскалывание (УЛТ). К преимуществам УЛТ относятся высокая точность разделения, его безотходность, высокая скорость и низкая энергоемкость, нулевая ширина реза и повышение механической прочности получаемых изделий, по

сравнению с другими способами обработки [9]. В данной работе приводятся результаты исследования лазерной обработки тонких кварцевых гель-стекол методом УЛТ.

Методика получения кварцевых гель-стекол

Тонкие кварцевые гель-стекла были синтезированы с использованием коллоидного варианта золь-гель метода [10]. Преимуществом этой методики, по сравнению с гибридным вариантом золь-гель метода, является значительное сокращение продолжительности технологического процесса за счет исключения операций гидролиза тетраэтилортосиликата и значительного увеличения скорости сушки ксерогелей (с 5–7 дней до 14–30 часов).

В качестве исходного сырья использовали аэросил (аморфный тонкодисперсный кремнезем SiO_2). Золь был получен из порошка аэросила марки А-300 и дистиллированной воды. Полученная смесь подвергалась ультразвуковой обработке в течение 2,5 часов и центрифугированию с целью удаления крупных частиц аэросила. Далее золь-коллоид разливали в формы и выдерживали до образования геля. Заготовки геля сушили на воздухе и прокаливали во фторсодержащей атмосфере, в случае необходимости синтеза активированных стекол ксерогели пропитывали в растворах хлоридов либо нитратов редкоземельных и переходных металлов. Далее их сушили на воздухе и спекали в потоке гелия при температуре 1300 °С до получения прозрачного стекла. Характеристики стекол, синтезированных золь-гель способом, приведены в табл. 1.

Лазерная обработка кварцевых стекол, синтезированных золь-гель методом

71

Таблица 1

Плотность, кг/м ³	2201
Теплоемкость, Дж/кг·°С	250
Теплопроводность, Вт/м·°С	0,7
Коэффициент линейного термического расширения, град ⁻¹ ·10 ⁻⁶	5,7
Модуль Юнга, ГПа	73
Коэффициент Пуассона	0,158
Микротвердость, МПа	7000–8500

Экспериментальные исследования

Исследования процессов термораскалывания кварцевых гель-стекол были выполнены на установке (схема на рис. 1) для лазерной обработки материалов [11]. На рис. 2 приведено расположение лазерного пучка и хладагента в плоскости обработки. Позицией 1 отмечен лазерный пучок с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм, позицией 2 отмечена зона подачи хладагента.

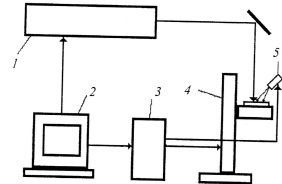
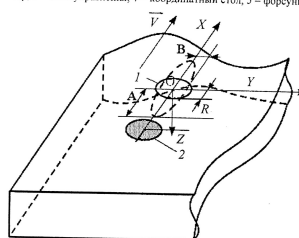
Рис. 1. Схема лазерной установки: 1 – CO₂-лазер, 2 – компьютер, 3 – блок управления, 4 – координатный стол, 5 – форсунка

Рис. 2. Расположения лазерного пучка и хладагента в плоскости обработки: 1 – лазерный пучок, 2 – хладагент

В качестве образцов для исследования режимов управляемого термораскалывания были использованы пластины из кварцевого стекла, синтезированного золь-гель способом толщиной от 0,5 до 1,5 мм.

Термораскалывание стеклянных пластин выполнялось следующим образом. Обрабатываемая кварцевая пластина перемещалась с помощью ко-

ординатного устройства относительно неподвижно расположенного лазерного пучка и форсунки, обеспечивающей подачу хладагента. При этом нагрев верхнего слоя кварца осуществлялся излучением пучка, поглощенного в поверхностном слое гель-стекла. В дальнейшем нагретая поверхность кварцевого гель-стекла резко охлаждалась при прохождении материалом области подачи хладагента. Таким образом, при обработке методом УЛТ кварцевая пластина нагревалась локальным поверхностным источником тепла в месте воздействия излучения CO₂-лазера и подвергалась резкому охлаждению в области воздействия хладагента.

Полученные экспериментальные результаты показывают принципиальную возможность нанесения разделяющей микротрещины при использовании УЛТ для обработки тонких гель-стекол. Однако необходимо отметить, что соответствующие режимы нанесения микротрещины обладают повышенной чувствительностью к малейшим изменениям значений технологических параметров. Это проявляется в наблюдаемых в эксперименте переходах УЛТ на режим сквозного термораскалывания или на срыв третинообразования при малейших отклонениях технологических параметров от заданного режима обработки.

Численное моделирование УЛТ кварцевых гель-стекол

Для выявления особенностей механизма УЛТ тонких кварцевых гель-стекол необходима информация о распределении термоупругих полей, возникающих в зоне обработки.

Невозможность использования аналитических методов для решения нелинейных задач термоупругости вызвала необходимость применения численных методов моделирования процессов лазерной обработки. В наибольшей степени для этих целей подходит метод конечных элементов [12–13]. Существенным преимуществом данного метода при расчете режимов лазерной обработки тонких гель-стекол является возможность нахождения решения задач для тел с произвольной геометрией, со смешанными граничными условиями и с учетом зависимости свойств материалов от температуры.

Таким образом, для выявления особенностей УЛТ тонких гель-стекол в соответствии с выше изложенной схемой реализации процесса было выполнено [14–15] конечно-элементное решение задачи о распределении термоупругих полей в кварцевых пластинах в квазистатической постановке. В расчетной модели были учтены основные факторы, оказывающие первостепенное влияние на процесс УЛТ. К ним относятся: параметры лазерного пучка (длина волны и плотность мощности лазерного излучения, размеры и форма лазерного пучка на поверхности разделяемого материала), скорость относительного перемещения лазерного пучка и материала, теплофизические свойства, количество и условия подачи хладагента в зо-

* Автор, с которым следует вести переписку.

ну обработки, теплофизические и физико-механические свойства разделяемого материала.

Для определения термоупругих полей, возникающих при лазерном термораскалывании образца, вначале выполнялся расчет полей температур. Для этого находилось решение вариационной задачи о минимуме функционала $\Phi(T)$, связанного с физическим процессом теплопроводности и обладающего тем свойством, что любая минимизирующая его функция удовлетворяет как исходному дифференциальному уравнению теплопроводности, так и граничным условиям, определяющим воздействие движущегося лазерного пучка при одновременном учете интенсивной теплоотдачи в месте подачи хладагента.

После определения температурного поля выполнялось вычисление компонент тензоров деформаций и напряжений. Используемые для расчетов свойства материалов приведены в табл. 1, при этом были учтены зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры [16–17]. Значения расчетных технологических параметров приведены в табл. 2. Расчеты проводились для пластины с геометрическими размерами $20 \times 10 \times 0,5$ мм.

Таблица 2. Значения технологических параметров (расчет)

№	Параметры лазерного пучка	Мощность лазерного излучения, Вт	Скорость резки, мм/с
1	Круг $R = 1$ мм	35	60
2	Эллипс $A = 3$ мм $B = 1$ мм	35	40

На рис. 3 представлены результаты расчета температурных полей, формируемых в исследуемом образце в результате обработки круглым и эллиптическим лазерными пучками, а на рис. 4 – распределение соответствующих им напряжений σ_{yy} действующих перпендикулярно плоскости разделения.

Как видно из рис. 3, оба технологических режима характеризуются приблизительно одинаковыми значениями максимальных температур ≈ 1200 °С, которые являются предельно допустимыми при обработке кварцевых стекол методом УЛТ, т. к. при более высоких температурах такие стекла теряют упругие свойства и становятся пластичными.

Как следует из графиков, представленных на рис. 4, в месте воздействия лазерного излучения формируется зона сжимающих напряжений, которая в случае использования круглого пучка (режим № 1) характеризуется большей величиной напряжений и более выраженной локализацией в плоскости разделения. Кроме этого, из рис. 4 видно, что в верхних слоях материала формируется зона растягивающих напряжений, расположенная относительно области подачи хладагента. Эта зона ограничена сжимающими напряже-

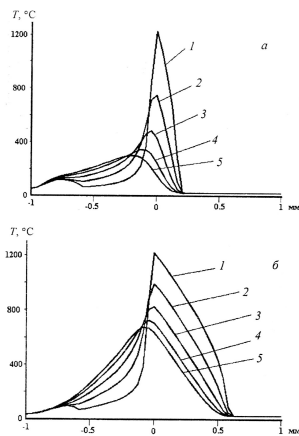


Рис. 3. Зависимость температуры от расстояния до центра лазерного пучка, °С: а – круглый лазерный пучок; б – эллиптический лазерный пучок ($Y = 0$ мм); 1 – $Z = 0$; 2 – 0,1 мм; 3 – 0,2 мм; 4 – 0,3 мм; 5 – 0,4 мм

ниями, сформированными лазерным пучком, и характеризуется несколько большими размерами, чем в случае использования эллиптического пучка (режим № 2). Однако в обоих случаях величина напряжений растяжения σ_{yy} действующих перпендикулярно плоскости обработки, недостаточно велика для инициирования, разделяющей микротрещины. Из анализа распределения термоупругих полей следует, что инициирование разделяющей микротрещины должно производиться в поверхностных слоях материала в зоне растягивающих напряжений, сформированных за счет подачи хладагента.

Проведенное численное моделирование позволяет сделать вывод о том, что после инициализации начальная микротрещина начинает свое движение и распространяется до зоны сжимающих напряжений, сформированных лазерным излучением. Далее нестационарный рост трещины прекращается, и ее развитие определяется изменением пространственного распределения зон растягивающих и сжимающих напряжений, обусловленных взаимным перемещением обрабатываемого материала, лазерного пучка и хладагента, как и в исследованном ранее случае обработки более толстых образцов.

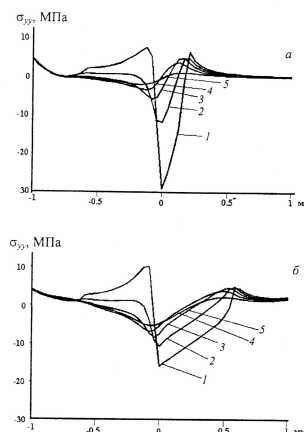


Рис. 4. Зависимость напряжений σ_{yy} от расстояния до центра лазерного пучка, МПа: а – круглый лазерный пучок; б – эллиптический лазерный пучок ($Y = 0$ мм); 1 – $Z = 0$; 2 – 0,1 мм; 3 – 0,2 мм; 4 – 0,3 мм; 5 – 0,4 мм

Заключение

В результате проведенных исследований были определены режимы обработки гель-стекол методом УЛТ. Тонкие кварцевые пластины были изготовлены при помощи коллоидного варианта золь-гель метода. Используемый вариант синтеза тонких кварцевых стекол по сравнению с гибридным вариантом золь-гель метода обеспечил значительное сокращение продолжительности технологического процесса за счет исключения операций гидролиза тетраэтилоксида и значительного увеличения скорости сушки ксерогелей.

Проведенный анализ термоупругих полей показывает, что распределение напряжений сжатия в объеме образца определяет форму и глубину

развития микротрещины, инициализация и развитие которой происходит в зоне растягивающих напряжений, сформированных в области подачи хладагента.

Литература

1. Gaishun V. E., Boiko A. A., Semchenko A. V., Melnichenko I. M. and Poddeneznyy E. N. SPIE – 1995, 263.
2. Poddeneznyy E. N., Melnichenko I. M., Plyushch B. V., Kapshai M. N. and Runtso N. K. Non-Organics Materials. – 1999 (12), N 38.
3. Емельянов В. А., Кондратенко В. С., Шалунаев С. В. и др. Анализ особенностей лазерного термораскалывания кварцевого стекла // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1991 (59), вып. 3, 90–92.
4. Shalupayev S. V., Semchenko A. V., Nikitjuk Y. V. Silica gel glasses after laser radiation // Material Science. – 2003 (27), N 4, 495–501.
5. Бокунь Б. В., Кондратенко В. С., Шалунаев С. В. и др. Термораскалывание полимерных тел при их обработке лазерными пучками специальной геометрии // Мат. препринт Института физики АН БССР. – 1987.
6. Шалунаев С. В., Шершнев Е. Б., Никитюк Ю. В. и др. Лазерное термораскалывание диэлектрических материалов // CERAMICS. POLISH CERAMIC BULLETIN. – 2001 (65), 75–83.
7. Шалунаев С. В., Шершнев Е. Б., Никитюк Ю. В. Лазерное разделение стекла в плоскости, параллельной поверхности // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2001 (9), № 6, 114–117.
8. Шалунаев С. В., Шершнев Е. Б., Никитюк Ю. В. Комбинированное лазерное термораскалывание // Лазерная физика и спектроскопия. Материалы IV Междунар. конф. В 2 ч. Гродно: ГрГУ. – 1999, ч. 2, 177–179.
9. Емельянов В. А., Шалунаев С. В., Шершнев Е. Б. и др. Динамика формирования полей температурных напряжений в процессе лазерного управляемого термораскалывания // Лазерные новости. – 1995, 14–17.
10. Плющ Б. В., Капшай М. Н. Способ получения заготовок кварцевого стекла (тонкие: от 0,1 до 1 мм) / Заявка РФ № 20040251; заявл. 26.03.2004.
11. Шалунаев С. В., Шершнев Е. Б., Никитюк Ю. В. Пат. 683 РБ, МПК С 03 В Установка для лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов / Заявка и 20010292; Заявл. 10.12.2001; Опубл. 30.09.2002.
12. Шабров Н. И. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. – Л.: Машиностроение. – 1983.
13. Северидин Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979.
14. Новачик В. Теория упругости. – М.: Мир. – 1975.
15. Падстригач Я. С., Ломачин В. А., Козлюк Ю. М. Термоупругость тел неоднородной структуры. – М.: Наука. – 1984.
16. Кискин И. К., Аверин В. Г., Аромзон Б. А. Таблицы физических величин. Справочник // Под ред. И. К. Кискина. – М.: Атомиздат. – 1976.
17. Мачула Г. А. Лазерная обработка стекла. – М.: Сов. радио. – 1979.

Shalupayev S. V., Gaishun V. E., Semchenko A. V. and Nikitjuk Y. V. Laser treatment of silica gel glasses synthesized with the sol-gel method.

The paper describes the results of laser thermosplitting of the thin gel-glass plates fabricated by the colloid variant of the sol-gel method. The thermelastic fields created by laser beam with a wavelength of 10.6 micrometers at laser treatment of thin gels-glasses are analyzed.

Поступила в редакцию 05.10.04.

© С. В. Шалунаев, В. Е. Гайшун, А. В. Семченко, Ю. В. Никитюк, 2005.