

1511

Том 68

Номер 10

Октябрь 2001

ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Выходит на русском и английском языках



JOURNAL
OF
OPTICAL TECHNOLOGY

Volume 68

Number 10

October 2001

ЛИТЕРАТУРА

1. Катис Г.П. Восприятие и анализ оптической информации автоматической системой. - М.: Машиностроение, 1986. - 416 с.
2. Лютер-Дэвис Б., Гамалий Е.Г., Янжи Ванг и др. Вещество в сильном лазерном поле // Квантовая электроника. - 1992. - Т. 19, № 4. - С. 317-359.
3. Ваньков А.Б., Козлов А.А., Чижов С.А., Яшин В.Е. Интерферометрия chirпированного импульса как метод дистанционного измерения доплеровских сдвигов частот // Опт. и спектр. - 1998. - Т. 84. - С. 672-676.
4. Бородин В.Г., Комаров В.М., Малинов В.А. и др. Лазерная установка "Прогресс-П" с усилением chirпированного импульса в неодимовом стекле // Квантовая электроника. - 1999. - Т. 29, № 2. - С. 101-105.

УДК 621.791.78

ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

©2001 г. С. В. Шалупаев, канд. физ.-мат. наук; А. В. Максименко; В. Н. Мышковец, канд. физ.-мат. наук; Ю. В. Никитюк

- Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Белоруссия

Предложен двухлучевой способ разделения керамических материалов с металлизированным слоем, сущность которого заключается в одновременном облучении обрабатываемой детали со стороны неметаллического слоя двумя лазерными пучками с разными длинами волн, одна из которых λ_1 соответствует максимальному поглощению лазерного излучения в металлическом слое, а вторая λ_2 соответствует максимальному поглощению в неметаллическом слое. Проведены численные расчеты термоупругих полей, возникающих в исследуемых образцах, методом конечных элементов. Полученные результаты могут быть использованы в технологии лазерной обработки диэлектрических материалов.

Коды OCIS: 140.3580, 140.3740, 350.3390.

Поступила в редакцию 20.02.2001.

Керамика как конструкционный материал обладает целым рядом преимуществ по сравнению с металлами и полимерными соединениями. Она широко используется для изготовления деталей различных машин и механизмов, эксплуатируемых в условиях воздействия высоких температур и в коррозионно-активных средах, а также широко используется в приборах электронной промышленности. Особенности межзатонного взаимодействия в химических соединениях, формирующих структуру керамики, таковы, что ей присущи высокие показатели упругости, твердости, сопротивления пластической деформации и, как следствие, высокие прочность, износостойкость, устойчивость к эрозии [1-3]. Эти же свойства создают трудности при ее обработке традиционными способами. В связи с этим возникает необходимость разработки высокоэффективных технологий обработки керамики, представляет интерес лазерная резка керамики методом термораскалывания. Теоретическим и экспериментальным исследованиям проблемы разделения хрупких неметаллических материалов лазерным излучением посвящен ряд работ, например [4-6].

В данной работе проведены исследования процесса термораскалывания керамических материалов с металлизированной поверхностью. Для этого использовалось излучение твердотельного лазера на ИАГ, обеспечивающего среднюю выходную мощность излучения 60 Вт на длине волны $\lambda_1 = 1,06$ мкм и работающего в непрерывном режиме, и газового CO_2 -лазера с выходной средней мощностью 35 Вт, работающего в непрерывном режиме, с длиной волны $\lambda_2 = 10,6$ мкм. Формирование излучения твердотельного лазера в пятно круглого сечения на поверхности обрабатываемого материала осуществлялось объективом с фокусным расстоянием 50 мм. Излучение CO_2 -лазера фокусировалось на поверхности материала комбинированной сферическо-цилиндрической линзой в пучок эллиптического се-

чения. Качество и точность разделения оценивались путем измерений сколов, а также искривлений на краях разрезанных образцов с помощью микроскопа БМИ-1П. На рис. 1 приведены схема расположения лазерных пучков в плоскости обработки и формы их сечений: лазерный пучок 1 с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, соответствующей максимальному поглощению металла 4; лазерный пучок 2 с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм, соответствующей максимальному поглощению в слое керамики 3; 5 и 6 - сечения пучков в плоскости обработки. Направление перемещения обрабатываемого двухслойного образца относительно лазерных пучков показано стрелкой.

В качестве образцов для исследования процесса разделения двухлучевым способом были использованы керамические пластины толщиной 0,5

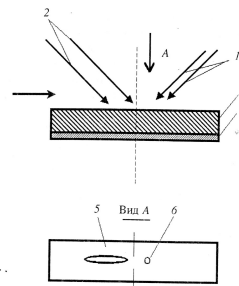


Рис. 1. Схема расположения лазерных пучков в плоскости обработки и формы их сечений.

мм и 1 мм с металлизированной экранной поверхностью в виде пленки из золота толщиной 10 нм. В таблице приведены полученные экспериментально оптимальные режимы разделения двухслойного материала керамика-золото. Из полученных экспериментальных результатов следует, что использование двухлучевого способа в соответствии с приведенной схемой (см. рис. 1) позволяет в значительной степени повысить качество и точность обработки. Лазерный пучок 1, проходя через керамический слой 3, частично в нем рассеивается и поглощается в металлическом слое 4, в результате чего этот слой нагревается. Часть тепла за счет теплопроводности проникает в неметаллический слой со стороны металлизированной поверхности. Излучение пучка 2, поглощаясь поверхностью керамики 3, осуществляет ее дополнительный нагрев.

Оптимальные режимы разделения двухслойного материала керамика-золото (эксперимент)

Материал	Толщина слоя керамики H , мм	Скорость реж., мм/с	Значения искривлений и сколов от линии разделения, мм
Керамика с металлизацией	0,5	15	0,030
(с использованием двухлучевой технологии)	1	10	0,052
Керамика с металлизацией	0,5	15	0,160
(с использованием однопучковой технологии)	1	10	0,190

Таким образом, керамическую пластину нагревают два локальных источника тепла. В результате их совместного воздействия в керамике возникают термоупругие напряжения. При определенных температурах керамика приобретает способность к пластической деформации: так, в алумооксидной керамике переход в пластическое состояние осуществляется при $T = 1050^\circ\text{C}$, поэтому превышение такой температуры в обрабатываемом образце в нашем случае недопустимо. Релаксация температурных напряжений в дефектах микроструктуры керамики, инициирующих образование магистральной трещины, в значительной степени затруднена по сравнению с металлическими материалами. В результате при определенных значениях технологических параметров лазерного термомасшталивания формируемые в объеме поликристаллического материала термоупругие поля вызывают образование трещины по линии обработки.

В соответствии с физической моделью процесса двухлучевого способа разделения металлизирован-

ной керамики, изложенной выше, в рамках теории термоупругости был выполнен расчет температурных полей и полей напряжений, формируемых в исследуемом образце. В связи с трудностями, возникшими при попытке использования аналитических методов для расчета термоупругих полей, возникающих в двухслойном материале керамика-золото в нелинейной постановке задачи, был использован метод конечных элементов [7]. Расчет термонапряжений был выполнен в квазистатической постановке. Квазистатическая постановка задачи означает, что напряженное состояние устанавливается значительно быстрее, чем тепловое равновесие. Погрешность в определении термонапряжений, связанная с пренебрежением инерционными эффектами, оказывается очень малой [8-9].

При выполнении расчетов учитывалось, что процесс лазерного термомасшталивания происходит наиболее эффективно при отсутствии пластической деформации в керамике и без оплавления металлизированного слоя. При выполнении этих условий температура керамики в области обработки может изменяться от 20°C до 1050°C , а температура золота от 20°C до 1063°C . При этом плотность и удельная теплоемкость керамики и золота принимались неизменными и равными соответственно $\rho_1 = 3960 \text{ кг/м}^3$ и $c_1 = 760 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$ для керамики и $\rho_2 = 19320 \text{ кг/м}^3$ и $c_2 = 130 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$ для золота [10-12].

Были учтены зависимости коэффициентов теплопроводности керамики и золота от температуры. Модуль упругости для керамики $E_1 = 380 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,222$, коэффициент температурного расширения $\alpha_1 = 80 \times 10^{-7} (1/^\circ\text{C})$, а для золота - $E_2 = 80,6 \text{ ГПа}$, $\nu_2 = 0,422$, $\alpha_2 = 165 \times 10^{-7} (1/^\circ\text{C})$. Расчеты проводились для следующих параметров лазерных пучков: большая ось $A = 3 \times 10^{-3} \text{ м}$, малая ось $B = 0,5 \times 10^{-3} \text{ м}$ для пучка с длиной волны излучения $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ и плотностью мощности излучения $P_0 = 3 \times 10^7 \text{ Вт/м}^2$; радиус пятна

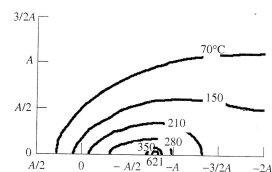


Рис. 2. Распределение температурных полей на границе раздела керамика-золото ($Z = H$).

излучения, падающего на слой золота, $R = 40 \text{ мкм}$ для пучка с длиной волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ и плотностью мощности излучения $P_0 = 65 \times 10^7 \text{ Вт/м}^2$. Расстояние между центрами лазерных пучков 5 было равным 1,74 мм. Расчеты проводились для двухслойного материала керамика-золото (толщина слоя керамики $H = 0,5 \text{ мм}$, толщина золота $h = 10 \text{ мкм}$), скорость перемещения образца относительно лазерных пучков 15 мм/с.

На рис. 2 представлены температурные поля на границе раздела керамика-золото ($Z = 0,5 \text{ мм}$). Сплошные линии определяют изотермы с указанными на рисунках значениями температур. Максимальные значения температуры поверхности керамики достигают 525°C , а на границе раздела керамика-золото 621°C . Таким образом, в керамике отсутствуют пластические деформации и не происходит оплавления металлизированного покрытия, что в свою очередь определяет хрупкий механизм разрушения образца. Следует отметить более высокую, чем на поверхности, пространственную локализацию высоких значений температуры на границе раздела керамика-золото, что объясняется меньшими геометрическими размерами сечения лазерного пучка с длиной волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$.

На рис. 3-5 представлены поля температурных напряжений, возникающие в двухслойном материале керамика-золото в результате двухлучевого воздействия. Как видно из рис. 3, вклад, вносимый излучением лазера в формирование конечного распределения напряжений, резко изменяется по глубине материала. Если на поверхности керамики инициирование образования магистральной трещины осуществляется за счет воздействия CO_2 -лазера (на расстоянии порядка $A/4$ позади от центра эллиптического лазерного пучка), то по мере приближения к металлизированной пленке ее развитие определяется напряжениями, формируемыми твердотельным лазером, которые достигают максимальных значений на границе керамика-золото. Эти напряжения характеризуются явно выраженной пространственной локализацией как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Анализ распределения напряжений, формируемых твердотельным лазером, показывает, что на расстоянии примерно 0,05 мм от линии разделения их значения превышают предел прочности алумооксидной керамики. Начиная с расстояния порядка 0,16 мм от линии разделения, излучение твердотельного лазера не оказывает заметного влияния на картину распределения результирующих напряжений и последние практически совпадают с напряжениями, которые формировались бы в этой зоне излучением отдельно взятого CO_2 -лазера. При дальнейшем увеличении расстояния от вертикальной плоскости, проходящей через большую ось эллиптического лазерного пучка ($Y = 0$),

напряжения в образце определяются излучением только CO_2 -лазера и не в состоянии поддерживать развитие трещины в керамике. Поэтому зона разрушающих напряжений при воздействии только CO_2 -лазера может быть локализована в вертикальном слое толщиной примерно 0,16 мм, что соответствует экспериментально полученным значениям отклоне-

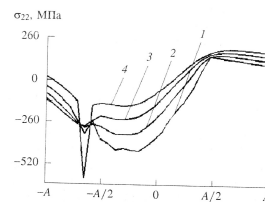


Рис. 3. Зависимость напряжений σ_{22} от расстояния до центра эллиптического лазерного пучка в керамике ($Y = 0 \text{ мм}$): 1 - $Z = 0$, 2 - $Z = H/4$, 3 - $Z = H$, 4 - $Z = H$.

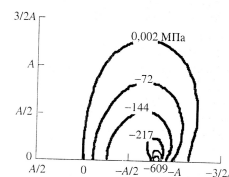


Рис. 4. Распределение полей напряжений σ_{22} на границе раздела керамика-золото ($Z = H$).

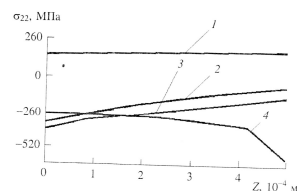


Рис. 5. Зависимость напряжений σ_{22} от глубины в керамике ($Y = 0$): 1 - $X = A/2$, 2 - $X = 0$, 3 - $X = -A/2$, 4 - $X = -S$.

ний разделяющей трещины от плоскости $Y = 0$. На расстоянии до 0,05 мм от вертикальной плоскости $Y = 0$ на границе керамика-золото основной вклад в результирующие напряжения вносится излучением твердотельного лазера, и именно пространственная локализация этих напряжений обуславливает размеры зоны разрушающих напряжений. Они совпадают с характерными размерами искривлений и сколов, полученными во время экспериментальных исследований по термораскалыванию двухслойного материала керамика-золото, результаты которых приведены в таблице.

Из представленных на рис. 5 распределений напряжений по глубине обрабатываемого материала в плоскости разделения на различных расстояниях от центра эллиптического лазерного пучка следует, что на расстоянии порядка $A/2$ перед центром эллиптического лазерного пучка формируется зона растягивающих напряжений, значения которых еще недостаточны для развития трещины. В центре и на расстоянии порядка $A/2$ позади от центра эллиптиче-

ского лазерного пучка термонапряжения, формируемые на поверхности образца, достигают пределов прочности аллюмооксидной керамики. С рассмотрением более глубоких слоев материала напряжения, формируемые CO_2 -лазером, уменьшаются, а напряжения в зоне воздействия твердотельного лазера, наоборот, возрастают с приближением к границе раздела керамика-золото (см. кривую 4 рис. 5.), что и обеспечивает более строгую вертикальную ориентацию разделяющей трещины по сравнению с односторонним вариантом, при котором вероятность искривления линии разделения магистральной трещины на неоднородностях структуры керамики значительно возрастает.

Таким образом, именно высокое значение и локальный характер напряжений, формируемых твердотельным лазером на границе керамика-золото, и определяют улучшение результатов при разделении двухслойного материала двухлучевым методом, что проявляется в значительном уменьшении искривлений и сколов от линии разделения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В.Я. Введение в техническую керамику. – М.: Наука, 1993. – 112 с.
2. Шевченко В.Я., Баринков С.М. Техническая керамика. – М.: Наука, 1993. – 187 с.
3. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
4. Мачука Г.А. Лазерная обработка стекла. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.
5. Шадунаев С.В., Шеринин Е.Е., Никитюк Ю.В. Комбинированное лазерное термораскалывание // Материалы IV Междунар. конф. Лазерная физика и спектроскопия. В 2-х ч. Ч. 2. – Гродно: ГрГУ, 1999. – С. 177–179.
6. Shalupaev S.V., Serdukov A.N., Myshkovets V.N. et al. Material heat treatment by laser single pulse of rectangular beam // Wspolczesna ceramika wybrane technologie i metody badan. – Warszawa, 1998. – S. 61–71.
7. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. – Л.: Машиностроение, 1983. – 212 с.
8. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
9. Подстригач Я.С., Ломанкин В.А., Колан Ю.М. Термоупругость тел неоднородной структуры. – М.: Наука, 1984. – 386 с.
10. Кикоин И.К., Аверин В.Г., Аронзон Б.А. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. Кикоина И.К. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
11. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 504 с.
12. Охотский А.С., Бороваикова Р.П., Нецаева Т.В. и др. Теплопроводность твердых тел. Справочник / Под ред. А.С. Охотского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 520.3/8.520.2

ЗЕРКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПОВ СИНХРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

©2001 г. В. А. Магерамов, канд. физ.-мат. наук

– Азербайджанский технический университет, г. Баку

В работе впервые для осуществления синхронных астрофизических наблюдений на основе классических зеркальных систем телескопов разработаны варианты зеркальных систем, содержащие соосно введенные дополнительные главное и вторичное зеркала, центральные отверстия которых больше или равны диаметрам главного и вторичного зеркал, обеспечивающих построение изображения наблюдаемого объекта в двух независимых фокусах.

Коды OCIS: 350.1270, 120.0280, 110.6770.

Поступила в редакцию 06.02.2001.

Введение

Телескоп является оптическим прибором, предназначенным для изучения небесных тел. По своему назначению инфракрасные телескопы являются астрофизическими телескопами специального назначения. В телескопах используются преимущественно центрированные оптические системы. По характеру оптики астрономические телескопы подразделяются на три основные группы: линзовые телескопы – рефракторы, зеркальные телескопы – рефлекторы, зеркально-линзовые [1, 2]. По количеству используемых зеркал зеркальные телескопы бывают однозеркальные, двухзеркальные и сложнотелескопные [1–3].

В однозеркальном телескопе по системе с прямым (главным) фокусом пучок параллельных лучей падает на параболическое зеркало, обладающее свойством собирать все лучи в точку – фокус. После отражения от первого (называемого главным) зеркала лучи собираются в прямом (главном) фокусе.

Под двухзеркальными системами понимают системы, содержащие два зеркала, участвующие в построении изображения [1]. Такая система может содержать произвольное число дополнительных плоских зеркал, которые не меняют сходимость пучка и теоретически не влияют на его абберации, но направляют свет в место, удобное для наблюдателя. В зависимости от положения вторичного зеркала по отношению к фокальной плоскости главного зеркала различают предфокальные и зафокальные двухзеркальные системы [1].

К сложным зеркальным системам относятся системы из трех и четырех зеркал [3].

Существующие оптические системы телескопов [1–3] независимо от количества зеркал имеют в ко-

нечном итоге один фиксированный рабочий фокус, что не позволяет проводить синхронные астрофизические наблюдения за одним и тем же небесным объектом в двух разных и независимых эквивалентных фокусах одного инструмента одновременно.

Существуют оптические схемы на основе однофокусных телескопов, построенные по принципу разделения поля зрения или спектральных диапазонов изображения [1, 4], которые имеют очевидные недостатки.

Системы синхронного наблюдения

Разделение поля зрения за счет ослабления света исследуемого объекта, вызванного применением полупрозрачного (либо дихроичного) отклоняющего зеркала, характерно для всех типов фототидов, используемых при астрофизическом наблюдении. При введении дополнительного полупрозрачного (либо дихроичного) зеркала в фокальную плоскость телескопа отклоняется около 4% света объекта для гидриды. Обычно толщина этих зеркал выбирается в пределах 2 мм, и поэтому потери света в нем из-за поглощения и рассеяния составляют около 1,5 и 2,5% соответственно. В связи с этим при вводе отклоняющего (либо дихроичного) зеркала теряется более 8% света, что очень существенно при астрономических наблюдениях. Кроме того, отклоняемый свет, который составляет около 4%, очень мал, особенно если ведется наблюдение объекта слабой яркости.

В работе [4] проанализированы требования к системе пространственной модуляции телескопа, разрабатываемого для SIRT (Shuttle Infrared Telescope Facility), и получено, что одновременное использование вторичного зеркала телескопа в систе-