

Тема 5 Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов

Перечень изучаемых вопросов:

1. Особенности двухлучевого лазерного термораскалывания металлокерамических структур;
2. Корректировка глубины проникновения трещины при управляемом двухлучевом лазерном термораскалывании;
3. Особенности двухлучевого лазерного термораскалывания толстой алюмооксидной керамики.
4. Лазерное термораскалывание с использованием U-образных лазерных пучков.

При обработке хрупких неметаллических материалов методами лазерного термораскалывания в большинстве ситуаций в качестве технологического инструмента используется излучение CO₂-лазеров с длиной волны 10,6 мкм, которое поглощается в тонких поверхностных слоях силикатных стекол и алюмооксидной керамики.

Применение излучения твердотельных лазеров, генерирующих излучение с длиной волны 1,06 мкм, для высокоточной обработки силикатных стекол и алюмооксидной керамики не получило достаточно широкого распространения, так как поглощение такого излучения в данных материалах незначительно, что является причиной неэффективности такой обработки. Но, как уже отмечалось, использование излучения с длиной волны равной 1,06 мкм в качестве технологического инструмента целесообразно при обработке пластин большой толщины из силикатного стекла и алюмооксидной керамики, что обусловлено объемным поглощением в них излучения указанной длины волны.

1 Особенности двухлучевого лазерного термораскалывания металлокерамических структур

В современных технологиях широко используются различные методы соединения разнородных материалов, например, керамики и стекла с металлами. Наиболее перспективными являются металлокерамические конструкции, что обусловлено их высокой механической прочностью, а также возможностью их эксплуатации при высоких температурах. Примером изделий из материалов такого типа являются керамические подложки для гибридных интегральных схем с металлизированной поверхностью. Существующие в микроэлектронике и приборостроении технологии обработки подобных конструкционных материалов основаны на применении механических станков с использованием абразивного инструмента. При этом режимы резки устанавливаются эмпирически, исходя из физико-механических

свойств материалов, геометрических размеров образцов и требований к точности их обработки.

Другие известные методы размерной обработки (термохимический, электроэрозионный, химико-каталитический, ультразвуковой) не нашли широкого применения в промышленной технологии вследствие сложности их реализации в производственных условиях и низкой производительности труда.

Перспективным является метод двулучевого лазерного термораскалывания металлокерамических структур, схема которого представлена на рисунке 1.

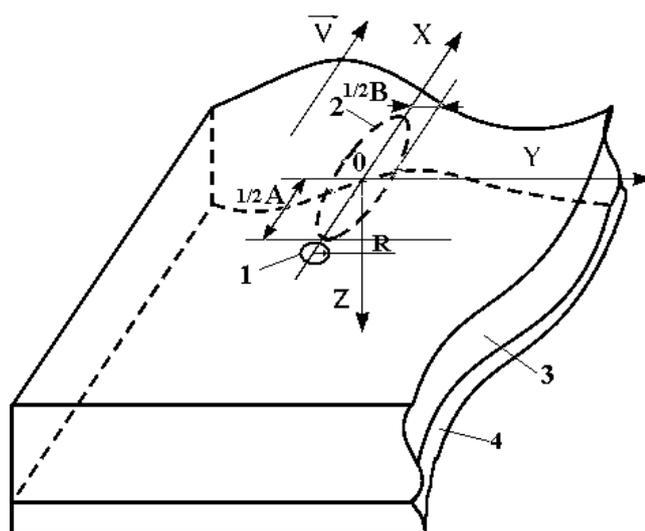


Рисунок 1 – Схема расположения лазерных пучков при двулучевой обработке металлокерамической структуры

При лазерном разделении двухслойного образца лазерный пучок 1 (длина волны 1,06 мкм), проходящий через керамический слой 3, поглощается в металлическом слое 4, который при этом нагревается, а также частично поглощается в объеме керамического слоя. Часть тепла вследствие теплопроводности проникает в неметаллический слой со стороны металлизированной поверхности. При этом энергия излучения пучка 2 (длина волны 10,6 мкм), поглощенного в поверхностном слое керамики 3, расходуется на ее нагрев.

В целях проведения сравнительного анализа было рассчитано распределение термоупругих полей при воздействии только CO₂-лазера; при этом расчете были использованы те же значения технологических параметров, что и при моделировании двулучевой обработки.

На рисунках 2 и 3 приведено распределение напряжений σ_{yy} , действующих перпендикулярно плоскости разделения образца на поверхности металлокерамической конструкции ($Z = 0$), в ее середине ($Z = H/2$) и на границе раздела «керамика – золото» ($Z = H$) для двух вариантов обработки: двулучевого и для варианта с использованием только воздействия CO₂-лазера. При этом в расчетах были использованы следующие значения

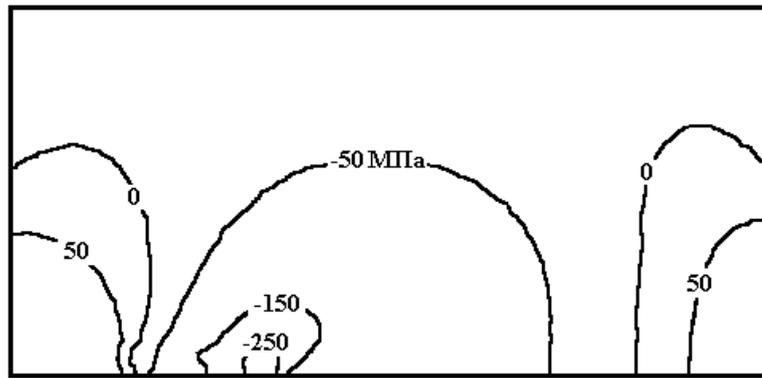
параметров лазерных пучков: большая ось $A = 4 \cdot 10^{-3}$ м, малая ось $B = 1 \cdot 10^{-3}$ м для эллиптического поперечного сечения пучка с длиной волны излучения 10,6 мкм и мощностью излучения равной 30 Вт; радиус пятна излучения YAG-лазера $R = 200$ мкм и мощность излучения 30 Вт.

Расчеты выполнены для двухслойного материала «керамика – золото» (толщина слоев: керамики $H = 1$ мм, золота $h = 20$ мкм). Скорость перемещения образца относительно лазерных пучков принята равной 30 мм/с.

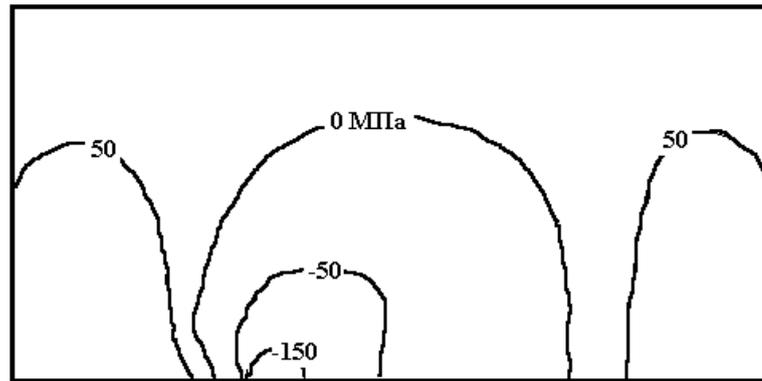
Геометрические размеры керамической подложки $20 \times 10 \times 1$ мм и слоя металла – $20 \times 10 \times 0,02$ мм.

На рисунках 2 и 3 видно, что вклады, вносимые излучением CO_2 -лазера и YAG-лазера в результирующее распределение напряжений на различной глубине, имеют существенные отличия. На поверхности образца высоких значений достигают напряжения, формируемые излучением CO_2 -лазера. Однако уже с середины образца большими значениями характеризуются напряжения, определяемые воздействием излучения YAG-лазера; величина этих напряжений достигает достаточно больших значений на границе «керамика – золото», что обусловлено поглощением в металлическом слое прошедшего сквозь керамику лазерного излучения с длиной волны равной 1,06 мкм.

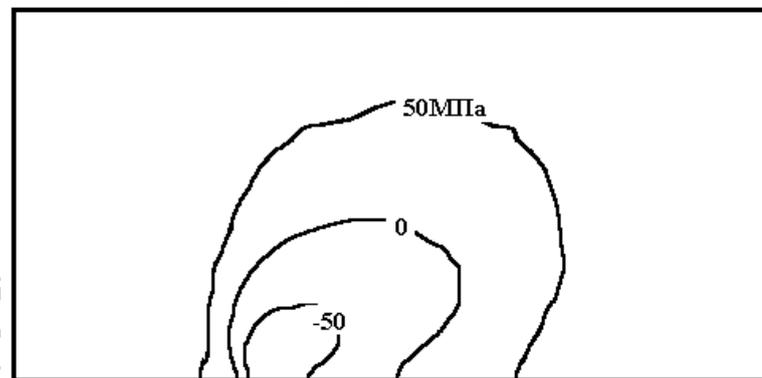
РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ. Ф. СКОРИНЫ



а



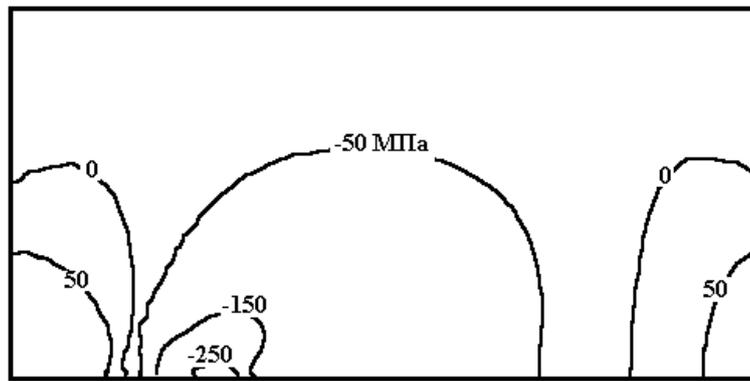
б



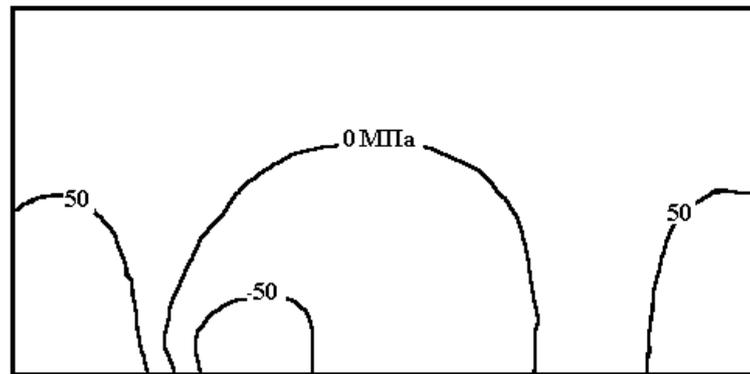
в

а) $Z = 0$; б) $Z = H/2$; в) $Z = H$

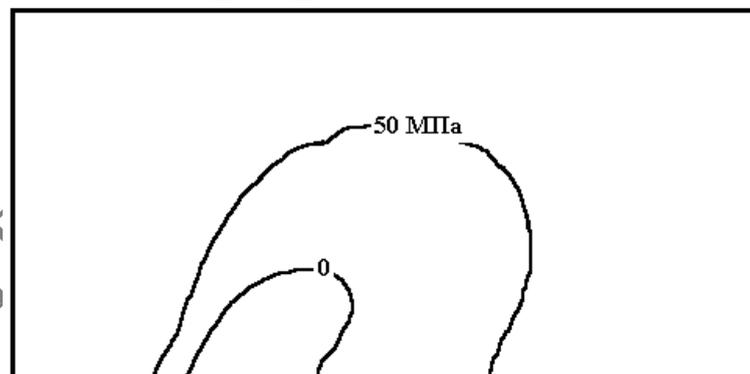
Рисунок 2 – Распределение полей напряжений σ_{yy} в металлизированной керамике при двухлучевой обработке



а



б



в

а) $Z = 0$; б) $Z = H/2$; в) $Z = H$

Рисунок 3 – Распределение полей напряжений σ_{yy} в металлизированной керамике при обработке CO_2 -лазером

Необходимо отметить, что на поверхности двухслойной металлокерамической структуры изолинии больших по величине напряжений охватывают более широкие зоны в области воздействия CO_2 -

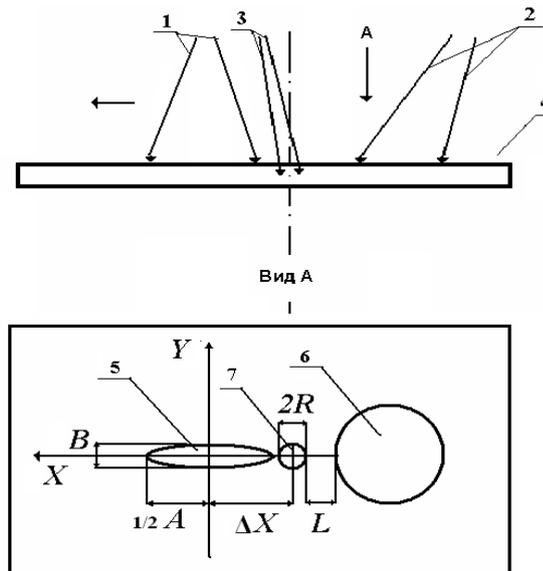
лазера, а зоны напряжений, обусловленных воздействием второго лазера менее обширны, что обусловлено большими геометрическими размерами сечения лазерного пучка с длиной волны равной 10,6 мкм. Таким образом, развитие разделяющей трещины вдоль линии лазерного воздействия происходит в поверхностных слоях алюмооксидной керамики и определяется напряжениями, формируемыми лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм. Однако на основе результатов анализа распределения напряжений в более глубоких слоях материала можно сделать вывод о существенном значении для дальнейшего развития разделяющей трещины вглубь материала напряжений, формируемых лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм. Этими напряжениями обусловлены уменьшение отклонений трещины от плоскости разделения и ее более строгая вертикальная ориентация не только на границе раздела «керамика – золото», но и в более близких к поверхности слоях алюмооксидной керамики.

Корректировка глубины проникновения трещины при управляемом двулучевом лазерном термораскалывании

Наиболее эффективный в настоящее время метод высокоточной обработки хрупких неметаллических материалов – УЛТ имеет существенный недостаток, затрудняющий его широкое применение. Этот недостаток заключается в ограничении глубины разделяющей микротрещины при использовании лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм вследствие его значительного поглощения поверхностными слоями силикатных стекол и алюмооксидной керамики.

Для обеспечения возможности корректировки глубины проникновения разделяющей микротрещины можно использовать двухлучевой способ разделения хрупких неметаллических материалов, сущность которого заключается в одновременном облучении обрабатываемой детали двумя лазерными пучками, с разными длинами волн, одна из которых соответствует интенсивному поглощению поверхностными слоями образца, а вторая соответствует объемному поглощению обрабатываемым материалом.

При этом лазерный пучок с длиной волны, соответствующей объемному поглощению излучения обрабатываемым материалом, размещают на линии реза между лазерным пучком с длиной волны, обеспечивающей поглощение излучения тонким поверхностным слоем обрабатываемого материала, и зоной воздействия хладагента.



- 1 – лазерный пучок с длиной волны 10,6 мкм,
- 2 – хладагент,
- 3 – лазерный пучок с длиной волны 1,06 мкм,
- 4 – обрабатываемое изделие,
- 5 – сечение лазерного пучка 1 в плоскости обработки,
- 6 – зона воздействия хладагента, 7 – сечение лазерного пучка 2

Рисунок 4– Схема взаимного расположения зон воздействия лазерных пучков и зоны охлаждения при двухлучевом термораскалывании

В соответствии с данной схемой обрабатываемый материал одновременно нагревают локальный поверхностный источник тепла в месте падения на поверхность пучка с длиной волны 10,6 мкм и объемный источник, формируемый лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм. Вследствие перемещения образца нагретая лазерными пучками поверхность подвергается охлаждению, попадая в область воздействия хладагента.

На рисунках 5 и 6 представлены распределения полей напряжений σ_{yy} в плоскости разделения образца в виде изолиний с указанными на них значениями напряжений в момент когда центр пучка CO_2 -лазера находится в точке 0 для случая однолучевого процесса ЛУТ и совместного воздействия CO_2 - и YAG-лазера соответственно при некоторых одинаковых параметрах обработки пластин листового силикатного стекла.

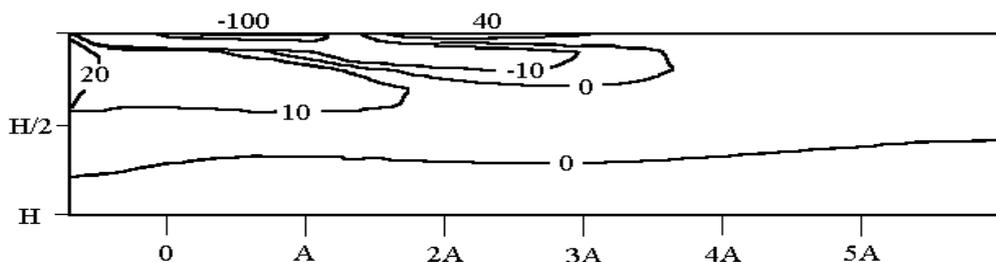


Рисунок 5– Распределение полей напряжений σ_{yy} в плоскости разделения образца в случае однолучевого термораскалывания ($Y=0$), МПа.

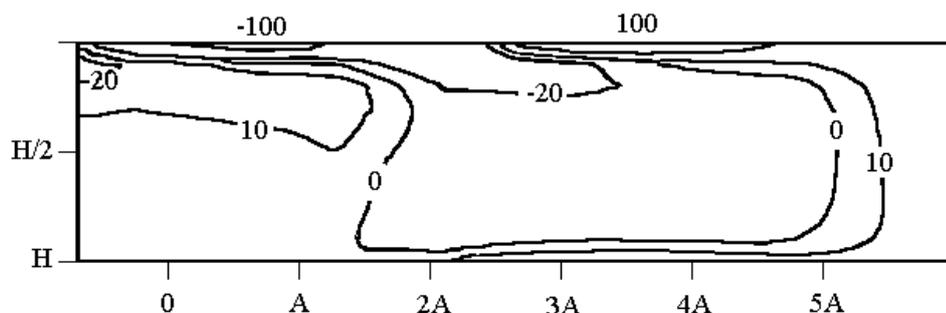


Рисунок 6– Распределение полей напряжений σ_{yy} в плоскости разделения образца в случае двухлучевого термораскалывания ($Y=0$), МПа.

Из сравнительного анализа распределения полей напряжений σ_{yy} приведенных на рисунках 5-6 следует, что в обоих случаях инициирование разделяющей микротрещины происходит в поверхностных слоях материала от трещиноподобного дефекта микроструктуры в зоне растягивающих напряжений, сформированных за счет подачи хладагента. Далее начальная микротрещина начинает свое движение и распространяется до зоны сжимающих напряжений, сформированных лазерным излучением. Распределение сжимающих напряжений в объеме образца определяет форму и глубину проникновения микротрещины, инициализация и интенсивное развитие которой, происходит в зоне растягивающих напряжений, сформированных в области подачи хладагента. После достижения микротрещиной максимальной глубины проникновения нестационарный рост трещины прекращается, и дальнейшее ее движение определяется изменением пространственного распределения зон растягивающих и сжимающих напряжений, обусловленных взаимным перемещением обрабатываемого материала, лазерного излучения и хладагента. В случае двухлучевой обработки, за счет объемного поглощения материалом излучения YAG-лазера, область сжимающих напряжений располагается в более глубоких слоях материала, что обеспечивает значительное увеличение глубины разделяющей микротрещины наблюдаемое на эксперименте в сравнении с однолучевой обработкой. Кроме этого необходимо отметить (смотри рисунок 6), что в случае двухлучевой обработки в зоне подачи хладагента величина растягивающих напряжений более чем в 2 раза превышает величину растягивающих напряжений, возникающих в результате однолучевой обработки, что обеспечивает высокую стабильность процесса зарождения микротрещины.

Полученные экспериментальные результаты при обработке пластин из силикатного листового стекла доказывают возможность получения разделяющей микротрещины большей глубины, в случае применения двухлучевой технологии и как следствие обеспечение повышения качества и точности обработки. Причем, чем больше толщина обрабатываемого материала, тем значительней относительное увеличение глубины микротрещины по сравнению с методом ЛУТ.

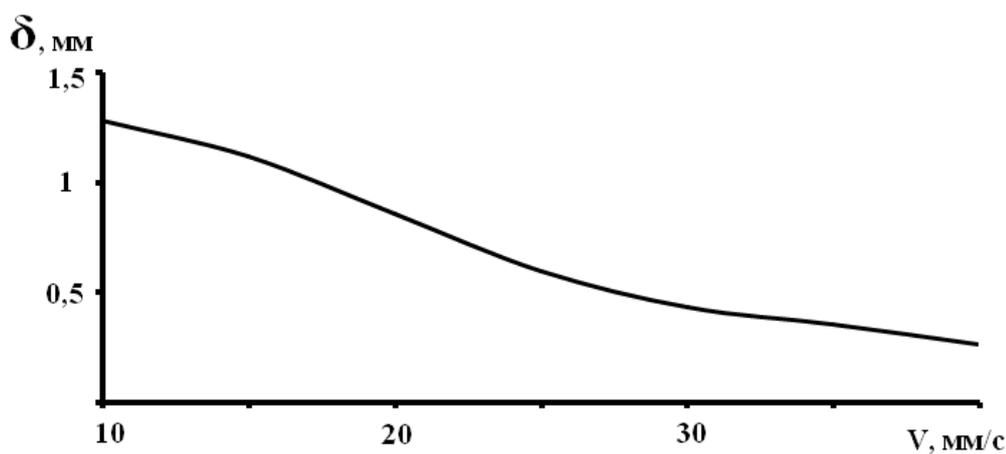


Рисунок 7 – Зависимость глубины микротрещины от скорости обработки

При проведении исследований были выявлены зависимости глубины лазерной микротрещины, формируемой при двухлучевом лазерном термораскалывании от скорости относительного перемещения лазерных пучков и обрабатываемого материала (рисунок 7), от мощности лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм (рисунок 8) и от мощности лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм (рисунок 9) для пластин листового силикатного стекла толщиной 5 мм при следующих параметрах обработки: лазерный пучок CO_2 -лазера фокусировался на поверхности стекла в эллиптическое пятно с большой осью $A = 6 \cdot 10^{-3}$ м и с малой осью $B = 2 \cdot 10^{-3}$ м; расстояние L было равным 3 мм; пучок излучения YAG-лазера фокусировался на поверхности стекла в круглое пятно с радиусом $R = 1 \cdot 10^{-3}$ м.

Как видно на рисунках 7 – 9, глубина микротрещины практически линейно зависит от скорости термораскалывания и от мощности лазерного излучения, как с длиной волны 1,06 мкм, так и с длиной волны 10,6 мкм. Исключением является небольшой участок на рисунке 9, в пределах которого увеличение мощности лазерного излучения сопровождается резким уменьшением глубины микротрещины, обусловленным чрезмерным нагревом материала и его оплавлением.

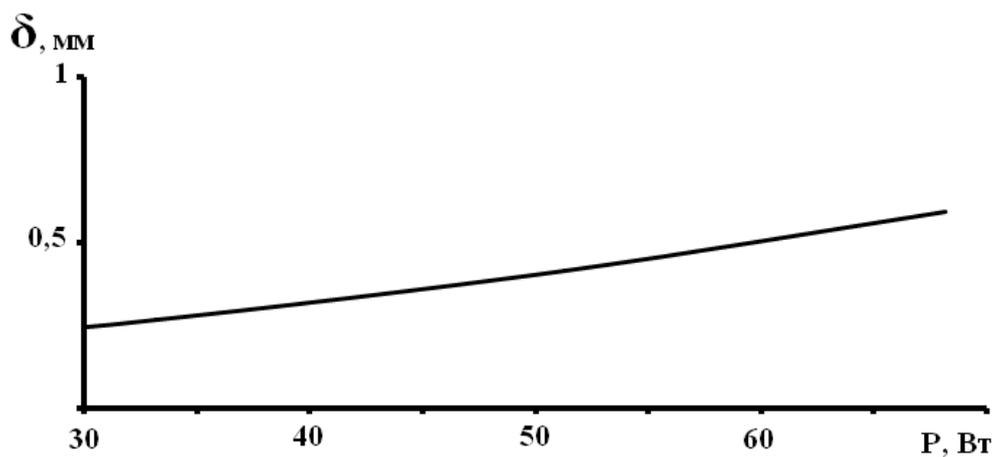


Рисунок 8 – Зависимость глубины микротрещины от мощности YAG-лазера

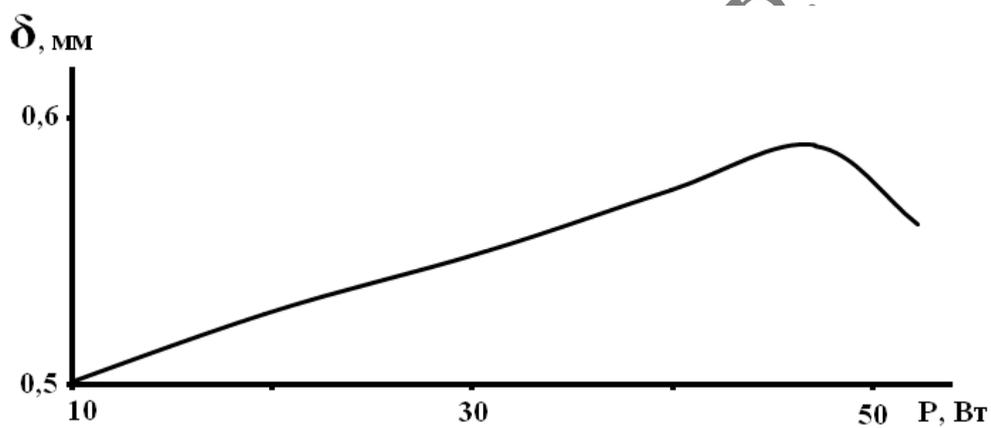


Рисунок 9 – Зависимость глубины микротрещины от мощности CO₂-лазера

Особенности двухлучевого лазерного термораскалывания толстой алюмооксидной керамики.

Применение метода двухлучевого лазерного термораскалывания для толстых пластин из алюмооксидной керамики толщиной до 10 мм, также как и в случае с обработкой силикатных стекол приводит к увеличению глубины разделяющей трещины вдоль линии обработки.

Существенным отличием разработанной технологии от известной технологии управляемого лазерного термораскалывания является то, что при ее реализации, для достижения величин термоупругих напряжений превышающих предел прочности керамики на разрыв, нагрев поверхностных слоев образца необходимо осуществлять до температур, превышающих температуру плавления алюмооксидной керамики. При последующем охлаждении происходит затвердевание расплавленных слоев, сопровождаемое образованием магистральной микротрещины.

Анализируя распределение напряжений σ_{yy} , приведенное на рисунках 10, можно предположить, что зарождение разделяющей микротрещины происходит в зоне расплава и обусловлено напряжениями растяжения, возникающими при затвердевании материала. Дальнейшее проникновение микротрещины вглубь образца обуславливают напряжения растяжения, сформированные вследствие подачи хладагента.

Анализируя распределение напряжений σ_{yy} , приведенное на рисунке 10 и 11, можно предположить, что зарождение разделяющей микротрещины происходит в зоне расплава и обусловлено напряжениями растяжения, возникающими при затвердевании материала. Дальнейшее проникновение микротрещины вглубь образца обуславливают напряжения растяжения, сформированные вследствие подачи хладагента.

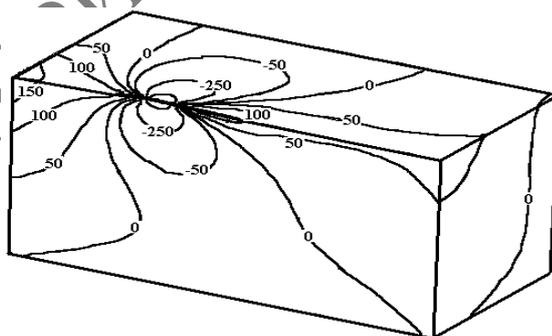


Рисунок 5.10 – Распределение напряжений σ_{yy} в алюмооксидной керамике при однолучевой обработке CO₂-

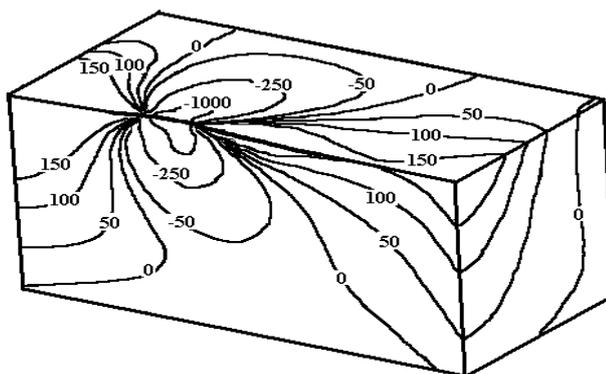


Рисунок 5.11 – Распределение напряжений σ_{yy} в алюмооксидной керамике при двулучевой обработке, МПа

При этом конечная глубина формируемой микротрещины определяется не столько конфигурацией изотерм, соответствующих температуре плавления, и изолиний, которые являются геометрическим местом точек с максимальным значением напряжений растяжения, сформированных в зоне подачи хладагента, сколько областью напряжений сжатия, опоясывающих зону растягивающих напряжений и обусловленных лазерным воздействием. Таким образом, при затвердевании расплавленных поверхностных слоев керамики, обусловленном интенсивным охлаждением, формируется микротрещина; ее конечная форма зависит от пространственной локализации зон растягивающих и сжимающих напряжений, сформированных соответственно под действием хладагента и лазерного излучения.



Рисунок 12 – Образец алюмооксидной керамики после лазерного термораскалывания

Однако в случае двулучевой обработки при одинаковых параметрах CO_2 -пучка и скорости обработки зона напряжений растяжения, достаточных для образования разделяющей микротрещины, располагается в более глубоких слоях материала, чем при обработке только излучением CO_2 -лазера.

Это обуславливает образование более глубокой трещины в толстых пластинах из алюмооксидной керамики.

На рисунке 12 представлена фотография образца алюмооксидной керамики, разделенного методом лазерного термораскалывания.

Лазерное термораскалывание с использованием U-образных лазерных пучков

Классическая схема реализации метода управляемого лазерного термораскалывания представлена на рисунке 13 и состоит в поверхностном нагреве материала лазерным пучком 1 и последующим охлаждением этой зоны при помощи хладагента 2.

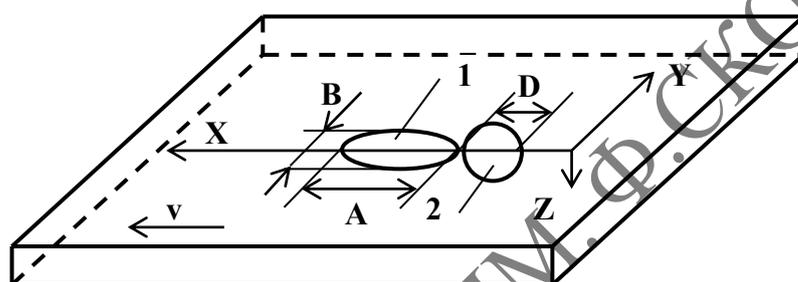


Рисунок 13– Схема реализации метода управляемого лазерного термораскалывания

В результате в области подачи хладагента образуется микротрещина, которая следует за лазерным пучком вдоль линии обработки. Окончательное разделение выполняется путем механического, термического или ультразвукового докалывания.

Однако у данной схемы есть недостаток. В том случае, когда линия, вдоль которой осуществляется нагрев и охлаждение материала (то есть ось X на рисунке 1) располагается близко от боковой границы образца, при наличии на ее кромке микродефектов наблюдается резкое отклонение микротрещины от линии обработки в сторону боковой границы вплоть до самой границы, и последующее прекращение развития микротрещины. По этой причине резку приходится осуществлять на удаленном расстоянии от боковой границы, что увеличивает количество отходов при производстве.

Характерное распределение термоупругих напряжений возникающих, например, в силикатном стекле представлена на рисунке 14

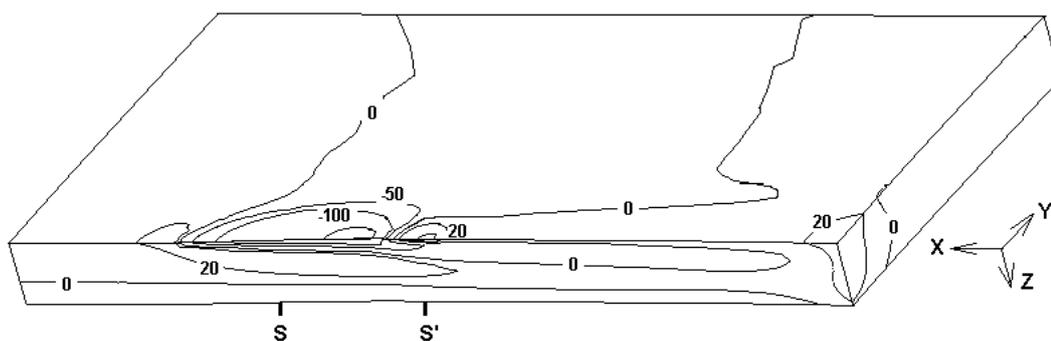


Рисунок 14 – Распределение термоупругих полей σ_{yy} (МПа) в образце при использовании эллиптического лазерного пучка

На рисунке позициями S и S' отмечены положения вдоль оси X центров лазерного пучка и хладагента соответственно. Анализ представленного на рисунке 14 пространственного распределения термоупругих полей σ_{yy} показывает, что в области подачи хладагента возникает зона значительных растягивающих напряжений. При этом величины растягивающих напряжений превышают предел прочности стекла. Именно в этой зоне инициализируется и развивается микротрещина. Спереди и снизу эта область ограничена зоной значительных сжимающих напряжений, сформированных движущимся лазерным пучком. Однако сбоку эта область не ограничена сильными сжимающими напряжениями, особенно когда обработка ведется вдоль границы образца или в непосредственной близости к ней.

Микродефекты и микротрещины на границах образца являются концентраторами напряжений. Поэтому при обработке вблизи от боковой границы образца в вершинах микротрещин и микродефектов образуются зоны значительных по величине растягивающих напряжений и направление развития основной микротрещины изменяется в сторону данных микродефектов и микротрещин. Для устранения данного эффекта целесообразно сформировать зону значительных по величине сжимающих напряжений не только спереди и снизу зоны растягивающих напряжений, сформированных хладагентом, но и по бокам от нее.

Этого можно добиться используя U-образные пучки (полукольцевые либо серповидные).

Наиболее эффективной является схема представленная на рисунке 15. Позицией 1 отмечена форма пятна лазерного источника на поверхности материала, позицией 2 – хладагент. При этом лазерные пучки с разными длинами волн, одна из которых соответствует интенсивному поглощению поверхностными слоями образца, а вторая соответствует объемному поглощению обрабатываемым материалом, формируются с поперечным сечением в виде серпа (Внутренний контур пучка представляет собой окружность, внешний контур представляет собой эллипс), а центр хладагента совпадает с центром серповидного лазерного пучка.

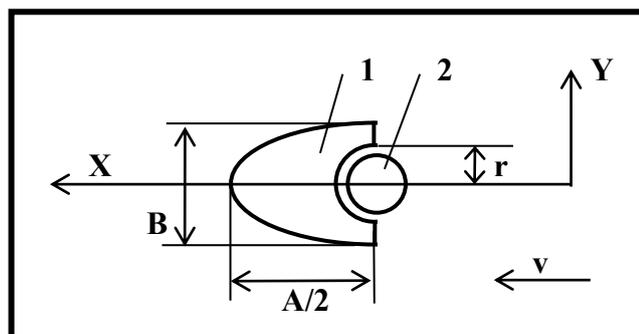


Рисунок 15 – Схема расположения лазерных пучков и хладагента в плоскости обработки

На рисунке 16 представлено характерное пространственное распределение термоупругих полей σ_{yy} возникающих при реализации данной схемы. Картина полей представлена для половины пластины. Позицией S на рисунке показано положение центра лазерного пучка и хладагента вдоль оси X.

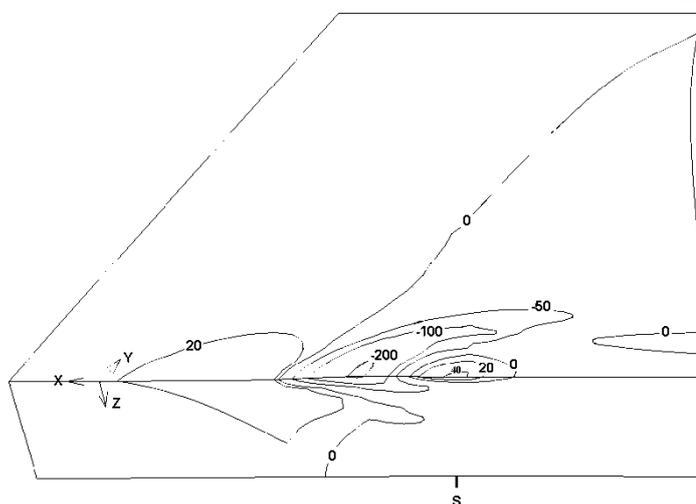


Рисунок 16 – Распределение термоупругих полей σ_{yy} (МПа) в образце при использовании серповидных CO_2 - и YAG- лазерных пучков

Как видно из представленного распределения, в области подачи хладагента возникает зона растягивающих напряжений, величины которых достаточно для инициализации микротрещины. Спереди и снизу ее огибает зона значительных по величине сжимающих напряжений, которые контролируют развитие микротрещины вдоль линии обработки и на глубину. Одновременно формируется зона значительных по величине сжимающих напряжений сбоку от области подачи хладагента. Данная зона позволяет контролировать отклонение микротрещины от линии, вдоль которой ведется разделения материала при обработке вблизи от боковой границы образца, т.е. позволяет блокировать отклонение микротрещины в сторону боковой границы при наличии на ней микродефектов и микротрещин.

При этом величина растягивающих напряжений в области подачи хладагента значительно выше нежели в случае использования только CO_2 -

лазера. Это в свою очередь обеспечивает высокую стабильность процесса зарождения микротрещины. В случае двулучевой обработки, за счет объемного поглощения материалом излучения YAG-лазера, область сжимающих напряжений располагается в более глубоких слоях материала. Снизу области растягивающих напряжений, образованных вследствие воздействия хладагента, зона сжимающих напряжений образуется по всей толщине материала. Такое пространственное расположение обеспечивает значительное увеличение глубины разделяющей микротрещины в сравнении с однолучевой обработкой (почти в два раза).

Список вопросов для самоконтроля:

- 1 Какие типы лазеров используются в процессе двулучевого лазерного термораскалывания металлокерамических структур и силикатных стекол?
- 2 Опишите схему метода двулучевого лазерного термораскалывания металлокерамических структур.
- 3 Опишите схему метода двулучевого лазерного термораскалывания силикатных стекол.
- 4 Укажите функциональное назначение источников лазерного излучения в процессе двулучевого лазерного термораскалывания металлокерамических структур и силикатных стекол?
- 5 Изложите механизм зарождения и развития разделяющей трещины в процессе двулучевого лазерного термораскалывания металлокерамических структур и силикатных стекол.
- 6 Какие положительные эффекты дает использование источника излучения с длиной волны 1,06 мкм в дополнение к источнику с длиной волны 10,6 мкм в процессе лазерного разделения силикатных стекол?
- 7 Каковы особенности двулучевого лазерного термораскалывания толстой алюмооксидной керамики?
- 8 С какой целью в процессе управляемого лазерного термораскалывания используются U-образные лазерные пучки?
- 9 Опишите схему метода двулучевого лазерного термораскалывания силикатных стекол с использованием U-образных пучков.

Список рекомендуемой литературы:

- 1 Лазерная резка керамических материалов с металлизированной поверхностью / С. В. Шалупаев, А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, Ю. В. Никитюк // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 10. – С. 41 – 44.

2 Лазерное термораскалывание диэлектрических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнева, А. Н. Сердюков, Ю. В. Никитюк // *Ceramics. Polish ceramic bulletin*. – 2001. – Vol. 65. – P. 75 – 83.

3 Laser thermosplitting of ceramic-metal sandwich-like structures with acoustical surveillance of microcrack propagation / S. V. Shalupaev [и др.] // «Archives of metallurgy and materials», Volume 54, Issue 4, 2009, pp. 963-968.

4 Лазерный двулучевой метод обработки высокопрочных керамических материалов / С. В. Шалупаев [и др.] // *Ceramics. Polish ceramic bulletin* – 2005. – Vol. 89. – P 44 – 49.

5 Двулучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / Е. Б. Шершнева [и др.] // *Оптический журнал*. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62 – 66.

6 Моделирование процесса двулучевого лазерного термораскалывания силикатных стекол в рамках линейной механики разрушения / С.В. Шалупаев [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники* – 2013. - №2(15). – С.29-34.

7 Исследование процесса лазерного термораскалывания толстых керамических пластин / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнева, Ю. В. Никитюк, А. А. Середина // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В*. – 2005. – № 6. – С. 140 – 143.

8 S. Shalupaev, Y. Nikitjuk, A Sereda. The analysis of laser thermosplitting of materials by using of crescent shape beams / *Материалы конференции Optical Techniques and Nano-Tools for aterial and Life Sciences (ONT4MLS-2010) 15 - 19 June 2010 Minsk*, в двух томах Том 2 P 36-43

9 The analysis of laser thermosplitting of materials by using of special geometry beams / А. А. Середина [и др.] // «Archives of metallurgy and materials», Volume 56, Issue 4, 2014, pp. 1149-1155.

РЕПОЗИТОРИЙ МНУ