

Тема 2 Классификация и физические механизмы формирования микротрещин при реализации основных методов лазерного термораскалывания

Перечень изучаемых вопросов:

- 1) Классификация методов лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов;
- 2) Сквозное лазерное термораскалывание
- 3) Управляемое лазерное термораскалывание.
- 4) Преимущества и недостатки сквозного и управляемого лазерного термораскалывания
- 5) Параллельное лазерное термораскалывание.
- 6) Особенности лазерного термораскалывания кварцевых стекол

1 Методы лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов классифицируются на следующие разновидности:

1. Сквозное лазерное термораскалывание.
2. Управляемое лазерное термораскалывание.
3. Параллельное лазерное термораскалывание.
4. Двухлучевое лазерное термораскалывание.
5. Лазерное термораскалывание по криволинейным траекториям.
6. Лазерное термораскалывание стеклоизделий трубчатой формы.
7. Асимметричное лазерное термораскалывание.
8. Лазерное термораскалывание пучками специальной геометрии

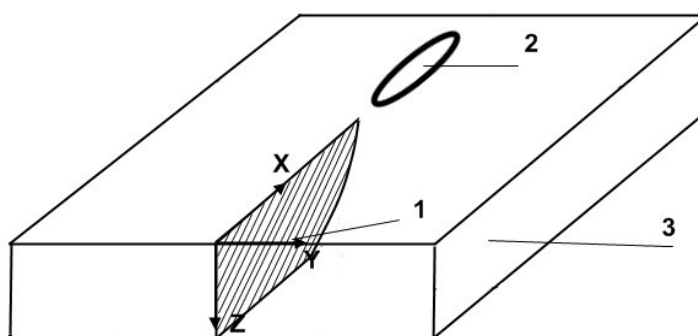
2 Сквозное лазерное термораскалывание

Лазерное скрайбирование обеспечивает возможность достаточно точного разделения стеклянных пластин. Однако после скрайбирования необходимо выполнить еще одну операцию—механическое разламывание по линии скрайбирования. Не говоря уже о том, что механическое разламывание должно осуществляться специальными приспособлениями, обеспечивающими прецизионное совмещение линии приложения механического усилия с линией скрайбирования, необходимость в такой операции снижает производительность и усложняет технологию разделения стекла.

Кроме того, механическое разламывание практически исключает возможность разделения стекла по сложному контуру и затрудняет автоматизацию процесса изготовления стеклянных изделий. Поэтому представляет большой интерес прямое термораскалывание стекла в результате создания в нем направленного термонапряжения под воздействием лазерного излучения.

Этот процесс заключается в следующем. Если вдоль поверхности стекла перемещать лазерный луч достаточной мощности, нагревающий поверхность стекла до температуры, превышающей предел термостойкости, но не доходящей до значения температуры стеклования, то при определенных условиях, о которых пойдет речь в дальнейшем, на некотором расстоянии от движущегося луча возникает трещина, которая следует за лучом. В результате стекло разделяется по описываемому лазерным лучом контуру. Лазерный луч как бы ведет за собой трещину, обеспечивая возможность вырезания изделий из стекла теоретически любой формы, хотя практически имеются ограничения.

Схема образования разделяющей трещины показана на рисунке 5



1 – трещина; 2 – лазерный пучок; 3 – образец.

Рисунок 5 – Схема образования разделяющей трещины при сквозном лазерном термораскалывании

Как уже неоднократно говорилось, в момент облучения стекла лазерным лучом прогревается очень тонкий поверхностный слой. Наводимый при этом большой градиент температуры в этом слое вызывает значительные напряжения, превышающие предел прочности стекла. Однако объем материала, в котором они возникают, в начальный момент времени очень мал, и, несмотря на значительную величину термонапряжений, они не в состоянии разрушить образец стекла — для этого необходимо, чтобы достаточно быстро прогрелся достаточный объем стекла. Такое прогревание осуществляется за счет теплопроводности. При этом тепло и, следовательно, напряжения по глубине стекла распространяются с конечной скоростью. Относительно слабая теплопроводность стекла обуславливает небольшую скорость распространения области действия термонапряжений по сравнению с возможными скоростями перемещения лазерного луча вдоль поверхности стекла, и разрушение стекла происходит с некоторым запаздыванием.

-100

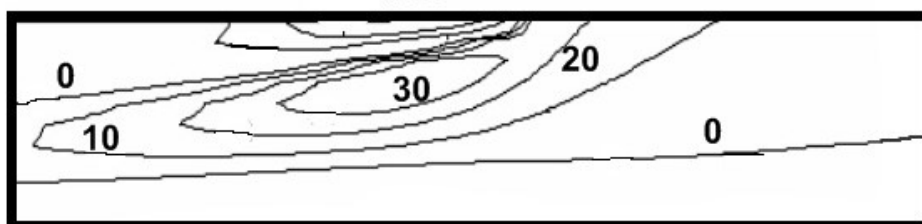
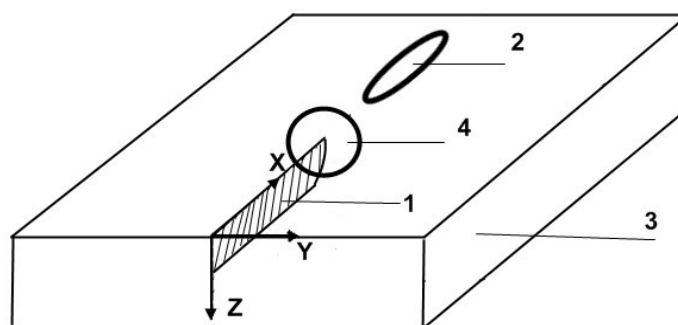


Рисунок 6 – Характерное распределение полей напряжений σ_{uu} в плоскости XZ при сквозном термораскалывании

3 Управляемое лазерное термораскалывание

Наиболее эффективным методом разделения хрупких диэлектрических материалов и, в частности, стекла является управляемое лазерное термораскалывание, схема которого показана на рисунке 7.



1 – трещина; 2 – лазерный пучок; 3 – образец, 4- зона воздействия хладагента.

Рисунок 7 – Схема образования разделяющей трещины при управляемом лазерном термораскалывании

Основной особенностью процесса управляемого лазерного термораскалывания является подача в зону обработки, после ее нагрева лазерным пучком (круглого или эллиптического сечения), охлаждающей воздушно-водяной смеси.

Управляемое лазерное термораскалывание (механизм формирования трещины)

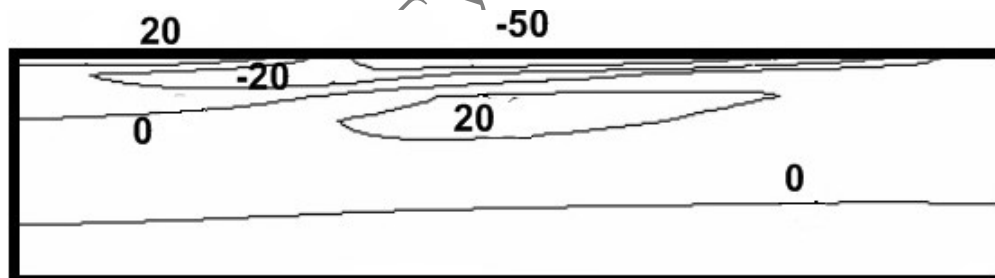


Рисунок 8 – Характерное распределение полей напряжений σ_{yy} в плоскости XZ при управляемом термораскалывании

В месте воздействия лазерного пучка формируется зона значительных по величине сжимающих напряжений, в верхних слоях образца формируется зона растягивающих напряжений, расположение которой определяется областью подачи хладагента. Необходимо отметить, что эта зона растягивающих напряжений ограничена сжимающими напряжениями, сформированными лазерным пучком. Из анализа распределения термоупругих полей следует, что инициирование разделяющей микротрещины происходит в поверхностных слоях материала от трещиноподобного дефекта микроструктуры в зоне растягивающих напряжений, сформированных за счет подачи хладагента. При этом величина растягивающих напряжений должна превышать предел прочности материала на растяжение. Далее начальная микротрещина начинает свое движение и распространяется до зоны сжимающих напряжений, сформированных

лазерным излучением. После чего нестационарный рост трещины прекращается, и дальнейшее ее движение определяется изменением пространственного распределения зон растягивающих и сжимающих напряжений, обусловленных взаимным перемещением обрабатываемого материала, лазерного пучка и хладагента. Таким образом распределение сжимающих напряжений, в объеме образца определяет форму и глубину развития микротрещины, инициализация и развитие которой, происходит в зоне растягивающих напряжений, сформированных в области подачи хладагента.

Зависимость глубины залегания микротрещины от скорости обработки носит экспоненциальный характер и при увеличении скорости быстро снижается.

С увеличением плотности мощности в пучке увеличивается градиент температур в материале, что в свою очередь ведет к увеличению значений термоупругих напряжений. Однако при этом следует учитывать, что температура нагрева не должна превысить предела термостойкости материала. Вследствие этого необходимо увеличивать скорость движения лазерного пучка. Зависимость скорости обработки, например, листового стекла вертикальной вытяжки от плотности мощности в лазерном пучке является практически линейной.

4 Сквозное лазерное термораскалывание (преимущества, недостатки)

К преимуществам метода сквозного лазерного термораскалывания не только перед механическими способами обработки, но и перед другими лазерными технологиями обработки хрупких неметаллических материалов следует отнести его безотходность, обусловленную нулевой шириной реза. Однако сквозное лазерное термораскалывание имеет несколько серьезных недостатков. Эта технология характеризуется низкой скоростью резки и зависимостью режимов термораскалывания от габаритов исходной заготовки, что делает практически невозможно термораскалывание образцов больших типоразмеров. Кроме этого, к недостаткам следует отнести низкую точность разделения. Наличие вышеперечисленных недостатков обусловило признание этого способа бесперспективным

Управляемое лазерное термораскалывание (преимущества, недостатки)

К основным преимуществам управляемого лазерного термораскалывания относятся высокая точность и высокая скорость обработки, которая сочетается с его безотходностью. Кроме этого применение данной технологии обеспечивает повышение прочности получаемых изделий.

Недостатком технологии управляемого лазерного термораскалывания является характерное для нее существенное ограничение максимальной

глубины проникновения микротрещины в материал, обусловленное использованием поверхностного лазерного нагрева.

5 Параллельное лазерное термораскалывание

Одной из разновидностей лазерного термораскалывания является параллельное лазерное термораскалывание.

Сущность данного метода заключается в следующем. На поверхность стекла воздействуют излучением CO_2 -лазера, которое для силикатного стекла лежит вне области прозрачности. Таким образом, попавшее на поверхность стекла излучение полностью поглощается в приповерхностном слое. При этом пучок формируется на поверхности в виде эллипса и ориентируется так, чтобы малая ось была направлена вдоль линии обработки. На рисунке приведена схема расположения лазерного пучка и образования микротрещины.

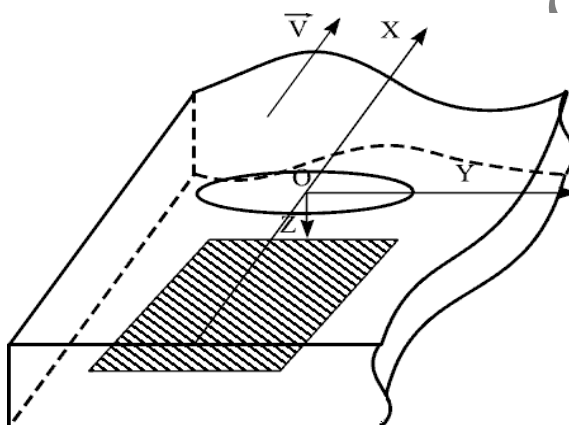


Рисунок 9 – Схема образования разделяющей трещины при параллельном лазерном термораскалывании

При перемещении лазерного пучка под поверхностью на определенной глубине формируется микротрещина, которая при определенных условиях, раскрывается в плоскости параллельной к поверхности материала. При этом длина микротрещины соизмерима с размерами большой оси эллиптического пучка.

Механизм параллельного лазерного термораскалывания

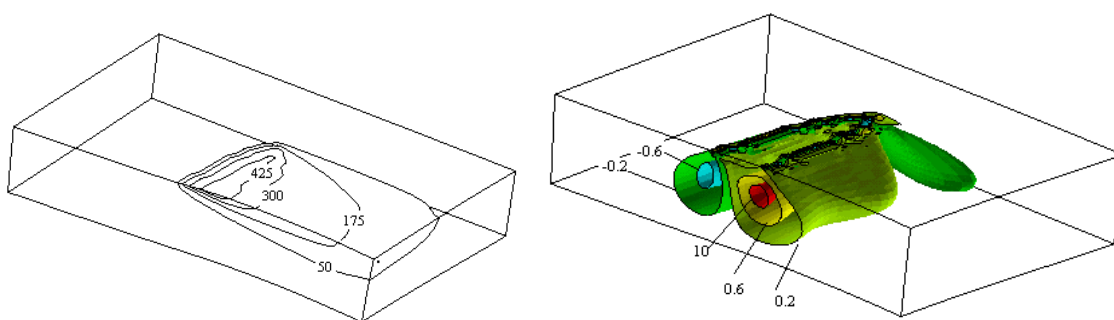


Рисунок 10– Распределение температур и напряжений вдоль оси Z при параллельном лазерном термораскалывании

При параллельном термораскалывании в глубине материала формируется зона растягивающих напряжений, которые перпендикулярны поверхности материала и обуславливают зарождение и развитие разделяющей трещины. При этом стабилизация процесса обеспечивается сжимающими напряжениями, окружающими локализованную зону растягивающих напряжений.

Необходимым условием получения термораскалывания стекла параллельно поверхности является наличие направленного снижения его прочности в объеме на некотором расстоянии от поверхности, поскольку напряжения вдоль оси Y (т.е. перпендикулярном направлению обработки) зачастую получаются больше нежели вдоль оси Z .

Эксперимент показывает, что для зарождения в стекле трещины параллельной поверхности можно использовать процесс лазерного управляемого термораскалывания стекла на заданную глубину. Для увеличения вероятности образования трещины параллельной поверхности целесообразно инициировать ее зарождение от наклонной микротрещины, расположенной на соответствующей глубине. Схема образования наклонной трещины представлена на рисунке

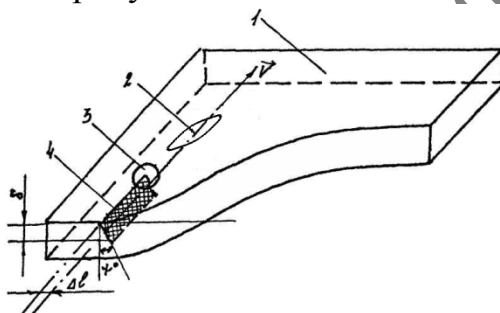


Рисунок 11 –Схема образования наклонной трещины

Прочность стекла при наличии наклонной микротрещины резко падает, и, таким образом, величины растягивающих термонапряжений расположенных в глубине материала будет достаточно для начала процесса терморасслоения.

Полученную на поверхности наклонную микротрещину 4 используют для отделения от стекла 1 слоя толщиной h_0 . Для этого стекло сканируют лазерным пучком 2 от микротрещины 4. Для параллельного термораскалывания стекла используется осесимметричный нагрев движущимися пучками круглого и эллиптического сечения. При сканировании стекла (см. рис.12) от микротрещины 1 на глубине формируется трещина 5 шириной 10 , плоскость которой не строго параллельна поверхности нагрева, а характеризуется стрелой прогиба Δh . Стрела прогиба наиболее выражена для лазерного пучка эллиптического сечения, ориентированного малой полуосью по направлению перемещения.

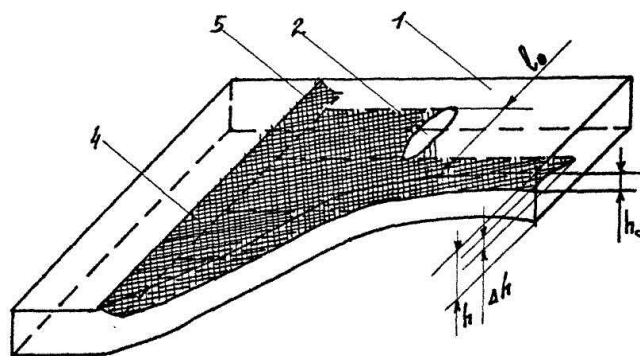


Рисунок 12- Схема получения стеклопластин заданной толщины методом лазерного параллельного термораскалывания стекла.

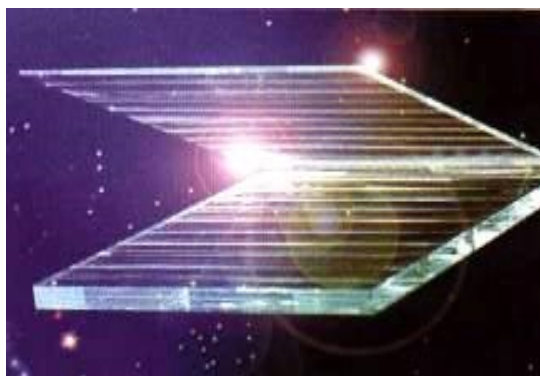


Рисунок 13– Вид стеклопластины, полученной методом параллельного лазерного термораскалывания

6 Особенности лазерного термораскалывания кварцевых стёкол

Кварцевое стекло характеризуется высокой механической прочностью и высокой термостойкостью, устойчиво к действию кислот и воды. Благодаря этим свойствам кварцевое стекло используется в качестве материала для изготовления иллюминаторов космических кораблей, окон фотоприемников и колб газоразрядных ламп. Из кварцевого стекла производятся линзы для передачи ультрафиолетового излучения и призмы для монохроматоров и спектрофотометров. Традиционные методы обработки кварцевого стекла основываются на применении для резки алмазного инструмента, гидроабразивной струи или на применении лазерного излучения для резки в режиме испарения материала. Основным недостатком традиционных методов является высокая дефектность получаемых кромок, что приводит к значительному снижению прочности стекла.

Использование метода управляемого лазерного термораскалывания для резки кварцевых стекол в том виде, в котором он реализуется при резке силикатного стекла затруднительно вследствие высокой термостойкости кварцевого стекла (коэффициент линейного термического расширения кварцевых стекол на порядок меньше, чем у большинства промышленных силикатных стекол). Величина растягивающих напряжений в области подачи

хладагента достигает предела прочности на растяжение при температурах близких к температуре плавления кварцевого стекла. Поэтому при нанесении предварительного дефекта на линии обработки, используемого для разупрочнения материала, происходит его оплавление при прохождении по нему лазерного пучка, что повышает прочность кварцевого стекла. Величина напряжений растяжения, действующих перпендикулярно плоскости обработки, в этом случае недостаточно велика для стабильной инициализации разделяющей микротрещины.

Для успешной реализации процесса управляемого лазерного термораскалывания кварцевых стекол необходимо применение предварительного нагрева поверхности кварцевого стекла в начальной точке траектории неподвижным лазерным пучком с последующим резким охлаждением и нанесением дефекта в области подачи хладагента.

Список вопросов для самоконтроля

1 Дайте классификацию методов лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов.

2 Опишите схему образования разделяющей трещины в процессе сквозного лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов.

3 Выделите основные преимущества и недостатки метода сквозного лазерного термораскалывания.

4 Опишите схему образования разделяющей трещины в процессе управляемого лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов.

5 Чем обусловлена форма и глубина развития трещины в процессе управляемого лазерного термораскалывания?

6 Какие преимущества и недостатки у метода управляемого лазерного термораскалывания?

7 Изложите сущность метода параллельного лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов.

8 Какое условие необходимо для получения термораскалывания стекла параллельно поверхности?

9 Какие затруднения возникают при реализации резки кварцевых стекол методом управляемого лазерного термораскалывания?

Список рекомендуемой литературы:

1 Мачулка, Г. А. Лазерная обработка стекла / Г. А. Мачулка. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.

2 Кондратенко, В.С. Исследование и разработка процесса резки стекла методом лазерного управляемого термораскалывания: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / В. С. Кондратенко. – М., 1983. – 179 с.

3 Способ резки неметаллических материалов: пат. 2024441 Рос. Федерация, МПК5 С 03 В 33/02 №5030537/33 // Кондратенко В.С. – заявл. 02.04.92; опубл. 15.12.94.

4 Прецизионная лазерная обработка хрупких неметаллических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Серeda // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2005. – № 3 (30). – С. 87 – 92.

5 Шалупаев, С.В. Лазерное разделение стекла в плоскости, параллельной поверхности / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2001. □ № 6 (9). – С. 114 – 117.

6 Сорокин, А. В. Разработка технологического процесса лазерного параллельного термораскалывания хрупких материалов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.14 / А. В. Сорокин; Моск. гос. ун-т приборостр. и информ. – М., 2011. – 24 с.

7 Шалупаев, С. В. Лазерное разделение стекла в плоскости, параллельной поверхности / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2001. – № 6 (9). – С. 114 – 117.

8 Shalupaev, S. V. Silica gel glasses after laser radiation / S.V. Shalupaev, A. V. Semchenko, Y. V. Nikitjuk // Material Science. – 2003. – Vol. 21, № 4. – P. 495 – 501

9 Лазерная обработка кварцевых стекол, синтезированных золь-гель методом / С. В. Шалупаев, В. В. Гайшун, А. В. Семченко, Ю. В. Никитюк // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2005. – № 2. – С 70 – 73.