

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 14622

(13) С1

(46) 2011.08.30

(51) МПК

C 03B 33/02 (2006.01)

C 03B 33/09 (2006.01)

## (54) СПОСОБ ЛАЗЕРНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ ХРУПКОГО НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

(21) Номер заявки: а 20091043

(22) 2009.07.10

(43) 2011.02.28

(71) Заявитель: Учреждение образования "Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины" (ВУ)

(72) Авторы: Шершнев Евгений Борисович; Соколов Сергей Иванович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины" (ВУ)

(56) RU 2024441 С1, 1994.

ВУ 10167 С1, 2007.

ВУ 982 С1, 1995.

RU 2237622 С2, 2004.

DE 4214159 С1, 1993.

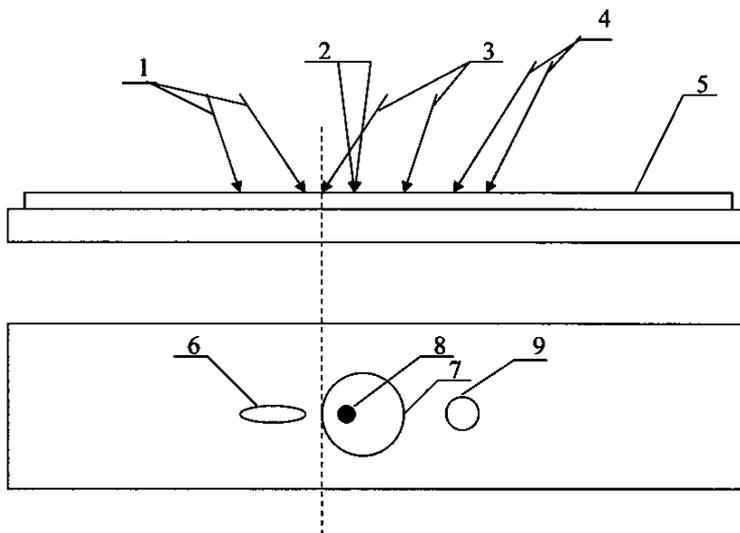
GB 1254120 А, 1971.

(57)

Способ лазерного управляемого термораскалывания хрупкого неметаллического материала, преимущественно стекла, путем нагрева линии реза лазерным пучком при относительном перемещении лазерного пучка и материала, локального охлаждения зоны нагрева подачей хладагента и инициирования разделяющей микротрещины путем нанесения дефекта на поверхность материала, отличающийся тем, что предварительно на нагретую лазерным пучком и охлажденную хладагентом поверхность материала воздействуют световым лучом, измеряют разность хода обыкновенного и необыкновенного световых лучей на данной скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала, выбирают скорость в соответствии с выражением:

$$11 < \Delta < 30,$$

где  $\Delta$  - разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей,



ВУ 14622 С1 2011.08.30

# ВУ 14622 С1 2011.08.30

нагревают линию реза с установленной скоростью  $V$  относительного перемещения лазерного пучка и материала, подают хладагент в зону нагрева и одновременно с подачей хладагента в зоне охлаждения наносят дефект, причем место нанесения дефекта устанавливают в соответствии выражением:

$$S = M \frac{P^2 l A}{e^d B},$$

где  $S$  - расстояние от заднего фронта лазерного пучка до места нанесения дефекта;

$M$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от теплофизических свойств материала и теплоотдачи хладагента;

$P$  - плотность мощности излучения;

$l$  - расстояние от заднего фронта пучка до переднего фронта зоны охлаждения;

$A$  - длина большой полуоси лазерного пучка;

$B$  - длина малой полуоси лазерного пучка;

$e$  - экспонента;

$d$  - глубина микротрещины,

а наносят дефект в зоне охлаждения в момент времени  $t$  от начала нагрева поверхности, определяемый в соответствии с выражением:

$$t = \frac{S + A}{V}.$$

---

Изобретение относится к способам обработки материалов, в частности способам резки неметаллических материалов, преимущественно стекла, и может быть использовано в электронной, стекольной, авиационной и других отраслях народного хозяйства для безотходной высококачественной резки хрупких неметаллических материалов.

Известен способ разделения резкой хрупкого неметаллического материала, преимущественно стекла, под действием термоупругих напряжений, включающий нанесение надреза по линии реза, последующий нагрев линии реза воздействием лазерного пучка при относительном перемещении пучка и материала и локальное охлаждение зоны нагрева подачей хладагента [1].

При этом предварительно до воздействия лазерным пучком на поверхности материала по линии реза наносят надрез.

Кроме того, одновременно с лазерным пучком и хладагентом на поверхность материала направляют поток горячего воздуха.

Искусственное уменьшение прочности стекла путем нанесения дефекта по линии реза позволяет резко повысить надежность зарождения трещины и уменьшить количество подводимой энергии, необходимой для термораскалывания. При нагревании хрупкого неметаллического материала в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия, а во внутренних - напряжения растяжения. При резком охлаждении нагретого материала его поверхностные слои охлаждаются быстрее и стремятся уменьшиться в объеме, а внутренние препятствуют этому. По этой причине на внешнюю часть материала уже действуют напряжения растяжения. Использование потока горячего воздуха позволяет уменьшить влияние хладагента на лазерное излучение. Применение описанного способа резки хрупких неметаллических материалов позволяет значительно повысить производительность термораскалывания по сравнению с традиционным методом термораскалывания без применения локального охлаждения зоны нагрева и потока горячего воздуха.

Однако известный способ резки хрупкого неметаллического материала под действием термоупругих напряжений не обеспечивает стабильное протекание процесса термораскалывания. Это связано с тем, что использование потока горячего воздуха изменяет форму хладагента на поверхности стекла, вследствие чего меняется картина распределения

напряжения растяжения, которое приводит к нестабильности развития микротрещины. Также поток горячего воздуха меняет картину распределения напряжений сжатия на поверхности стекла в зоне воздействия лазерного излучения, что также приводит к нестабильности термораскалывания и отклонению линии реза.

Применение описанной схемы термораскалывания хрупких неметаллических материалов не позволяет получить повышение стабильности и точности термораскалывания.

Наиболее близким к заявляемому способу является способ лазерного управляемого термораскалывания хрупкого неметаллического материала, преимущественно стекла, путем поверхностного нагрева линии реза лазерным пучком при относительном перемещении лазерного пучка и материала и локального охлаждения зоны нагрева подачей хладагента и инициирования разделяющей микротрещины путем нанесения дефекта на поверхность материала [2].

При этом вначале на поверхность материала по линии реза наносят надрез с плавно возрастающей глубиной, а нагрев и охлаждение осуществляют последовательно, начиная с наиболее глубокого места надреза.

Кроме того, скорость относительного перемещения пучка и материала выбирают из соотношения  $V = K \frac{a(b+1)}{\delta}$ , где  $K$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от теплофизических свойств материала и плотности мощности излучения,  $a$  - поперечный размер пучка на поверхности материала,  $b$  - продольный размер пучка на поверхности материала,  $l$  - расстояние от заднего фронта пучка до переднего фронта зоны охлаждения,  $\delta$  - глубина несквозной разделяющей микротрещины.

Однако данный способ имеет следующие недостатки.

Предварительное нанесение надреза до поверхностного нагрева линии реза лазерным пучком не обеспечивает надежное зарождение и развитие микротрещины, поскольку к моменту нанесения дефекта на поверхности и в объеме материала не сформирована область с распределенными напряжениями.

Кроме того, невозможно точно определить скорость относительного перемещения пучка и материала, которую выбирают из соотношения  $V = K \frac{a(b+1)}{\delta}$ , где  $V$  - скорость относительного перемещения пучка и материала,  $K$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от теплофизических свойств материала и плотности мощности излучения,  $a$  - поперечный размер пучка на поверхности материала,  $b$  - продольный размер пучка на поверхности материала,  $l$  - расстояние от заднего фронта пучка до переднего фронта зоны охлаждения.

Параметры размера пучка на поверхности, а именно продольный и поперечный размеры, из-за влияния распределения энергии по сечению пучка при различных скоростях будут отличаться. Таким образом, по известному способу нанесение предварительного надреза и совмещение его с лазерным пучком возможно в предположении, что лазерный источник работает в идеальных условиях. На практике перераспределение энергии по пучку выражается в нестабильности зарождения микротрещины от надреза. Поэтому процесс термораскалывания либо прерывается, либо возможно искривление траектории в начале термораскалывания при стыковке замкнутых контуров.

Задача, решаемая заявляемым изобретением, заключается в повышении надежности способа термораскалывания.

Технический результат, достигаемый заявляемым изобретением, заключается в обеспечении к моменту нанесения дефекта сформированных на поверхности и в объеме материала областей с распределенными напряжениями, которые обеспечивают надежное развитие дефекта в управляемую микротрещину.

Указанный технический результат достигается тем, что в способе лазерного управляемого термораскалывания хрупкого неметаллического материала, преимущественно стек-

ла, путем нагрева линии реза лазерным пучком при относительном перемещении лазерного пучка и материала, локального охлаждения зоны нагрева подачей хладагента и иницирования разделяющей микротрещины путем нанесения дефекта на поверхность материала, согласно изобретению, предварительно на нагретую лазерным пучком и охлажденную хладагентом поверхность материала воздействуют световым лучом, измеряют разность хода обыкновенного и необыкновенного световых лучей на данной скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала, выбирают скорость в соответствии с выражением:

$$11 < \Delta < 30,$$

где  $\Delta$  - разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей, нагревают линию реза с установленной скоростью  $V$  относительного перемещения лазерного пучка и материала, подают хладагент в зону нагрева и одновременно с подачей хладагента в зоне охлаждения наносят дефект, причем место нанесения дефекта устанавливают в соответствии с выражением:

$$S = M \frac{P^2 l A}{e^d B},$$

где  $S$  - расстояние от заднего фронта лазерного пучка до места нанесения дефекта;

$M$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от теплофизических свойств материала и теплоотдачи хладагента;

$P$  - плотность мощности излучения;

$l$  - расстояние от заднего фронта пучка до переднего фронта зоны охлаждения;

$A$  - длина большой полуоси лазерного пучка;

$B$  - длина малой полуоси лазерного пучка;

$e$  - экспонента;

$d$  - глубина микротрещины,

а наносят дефект в зоне охлаждения в момент времени  $t$  от начала нагрева поверхности, определяемый в соответствии с выражением:

$$t = \frac{S + A}{V}.$$

Сущность изобретения заключается в следующем.

При относительном перемещении лазерного пучка и материала имеет место сложная картина распределения термоупругих напряжений, вызванных резкими перепадами температуры, приводящими к значительным температурным градиентам.

Область нагрева поверхности материала лазерным излучением характеризуется распределением термоупругих напряжений, ключевую роль в котором играют напряжения сжатия. Интенсивные напряжения сжатия испытывает разогретая область, стремясь увеличить свой объем со стороны основной холодной массы материала. Для осуществления процесса управляемого термораскалывания материала необходимо получить в области нагрева максимальные напряжения растяжения. Для создания напряжений растяжения на поверхности нагретого лазерным излучением участка материала в область нагрева подают хладагент вслед за лазерным пучком. Происходит перераспределение термоупругих напряжений вследствие изменения объема разогретой области материала под действием охлаждения. На поверхности и в приповерхностной области возникает распределение напряжений, при котором напряжения растяжения достигают предельно возможных значений в выбранном режиме нагрева и охлаждения. Материал испытывает локальный изгиб. Таким образом, на поверхности и в объеме материала создаются условия, при которых наиболее вероятно протекание процесса управляемого термораскалывания.

При воздействии световым лучом на нагретую и охлажденную поверхность материала будет происходить разделение светового луча на обыкновенный и необыкновенные лучи. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость вещества зависит от деформации и

проявляется в виде двойного лучепреломления. При одноосном растяжении или сжатии изотропное тело приобретает свойства оптически одноосного кристалла с оптической осью, параллельной оси растяжения или сжатия. Исследование двойного лучепреломления под действием нагрузок в обрабатываемом материале позволяет установить характер и распределение в ней напряжений. Измерение разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей позволяет оценить механические напряжения в материале.

При постоянной плотности мощности лазерного излучения величина удельного энергоклада будет зависеть от относительного перемещения лазерного пучка и материала. Чем меньше скорость, тем больше остаточные напряжения. Таким образом, измерение величины разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей позволяет определить величину остаточных механических напряжений, возникающих на данной скорости относительного перемещения.

Установлено, что процесс термораскалывания будет надежным, если после нагрева лазерным пучком и охлаждения подачей хладагента при относительном перемещении лазерного пучка и материала вдоль линии термораскалывания образуется зона остаточных напряжений, в которой разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей находится в пределах от 11 до 30 нм.

Однако из экспериментальных исследований вытекает, что одного создания максимальных напряжений растяжения вдоль желаемой линии реза путем подачи хладагента в зону нагрева недостаточно для термораскалывания материала.

Известно, что для осуществления термораскалывания материала необходимо локальное ослабление прочности материала, а именно создание начального дефекта на поверхности материала в зоне подачи хладагента. При нанесении дефекта в момент охлаждения нагретой области на поверхности материала существуют максимальные напряжения растяжения.

Надежное развитие микротрещины происходит, если дефект наносят в зоне максимальных напряжений растяжения.

Сущность изобретения поясняется фигурой, на которой приведена схема взаимного расположения зоны воздействия лазерного пучка, зоны охлаждения за счет воздействия хладагента, зоны воздействия светового луча и места нанесения дефекта в процессе термораскалывания.

Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 - место нанесения дефекта, позицией 3 - хладагент, позицией 4 - световой луч, позицией 5 - обрабатываемый материал, позицией 6 - зона воздействия (сечение) лазерного пучка 1 на плоскости обрабатываемого материала 5, позицией 7 - зона охлаждения, образуемая в результате воздействия хладагента, позицией 8 - зона нанесения дефекта, позицией 9 - зона воздействия светового луча.

Способ осуществляют следующим образом.

Предварительно определяют скорость относительного перемещения лазерного пучка 1 и материала 5 для осуществления управляемого термораскалывания. Для этого образец обрабатываемого материала 5 устанавливают на координатном столе. Включают перемещение стола с заданной скоростью и на поверхность материала 5 направляют лазерный пучок 1, в зону нагрева подают хладагент 3. Вслед за охлажденной зоной 7 направляют световой луч 4 и в зоне 9 воздействия светового луча 4 измеряют разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей на данной скорости относительного перемещения лазерного пучка 1 и материала 5.

Скорость относительного перемещения лазерного пучка 1 и материала 5 подбирают до тех пор, пока разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей не будет находиться в пределах от 11 до 30 нм. Скорость, при которой разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей находится в пределах от 11 до 30 нм, и будет скоростью  $V$  относительного перемещения лазерного пучка 1 и материала 5, с которой осуществляют процесс лазерного термораскалывания.

## ВУ 14622 С1 2011.08.30

Далее определяем место нанесения дефекта по формуле  $S = M \frac{P^2 l A}{e^d B}$ , где  $S$  - расстояние от заднего фронта лазерного пучка до места нанесения дефекта;  $M$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от теплофизических свойств материала и теплоотдачи хладагента;  $P$  - плотность мощности излучения;  $l$  - расстояние от заднего фронта пучка до переднего фронта зоны охлаждения;  $A$  - длина большой полуоси лазерного пучка;  $B$  - ширина малой полуоси лазерного пучка;  $e$  - экспонента.

И, наконец, определяем время нанесения дефекта по формуле  $t = \frac{S + A}{V}$ , где  $S$  - расстояние от заднего фронта лазерного пучка до места нанесения дефекта;  $A$  - длина большой полуоси лазерного пучка,  $V$  - скорость относительного перемещения лазерного пучка и материала. Полученные расчетные данные времени  $t$ , расстояния  $S$  и выбранной скорости  $V$  относительного перемещения лазерного пучка 1 и материала 5 вносят в устройство управления координатным столом.

Исходный лист материала 5 устанавливают на координатном столе. Включают перемещение стола со скоростью  $V$  и на поверхность материала направляют лазерный пучок 1 по линии реза. Одновременно с лазерным пучком 1 на поверхность материала подают хладагент 3 так, чтобы зона охлаждения 7 на поверхности материала располагалась вслед за зоной воздействия 6 лазерного пучка 1 соосно направлению относительного перемещения лазерного пучка 1 и материала 5. Через время  $t$  на поверхность материала подают хладагент 3 и одновременно на расстоянии  $S$  от заднего фронта лазерного пучка наносят дефект в зоне 8, который является инициатором зарождения микротрещины. Далее микротрещина распространяется по направлению относительного перемещения в зоне растягивающих напряжений, сформированных под действием хладагента 3. Данная разделяющая микротрещина развивается до зоны сжимающих напряжений, возникающих в результате взаимодействия лазерного пучка 1 с обрабатываемым материалом 5. Таким образом, в материале 5 под действием сжимающих и растягивающих напряжений, обусловленных воздействием лазерного пучка 1 и хладагента 3, происходит распространение разделяющей микротрещины. После нанесения разделяющей микротрещины прекращают воздействие лазерного пучка 1, подачу хладагента 3 и возвращают координатный стол в исходное положение.

### Пример 1.

Термораскалывание пластины из кварцевого стекла толщиной  $h = 3$  мм осуществляли с помощью излучения серийного  $\text{CO}_2$  лазера типа ЛНГ-703 с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм. Пучок на поверхности пластин формировали с помощью сферической линзы из монокристалла  $\text{NaCl}$  с радиусом кривизны  $R_{\text{сф}} = 64$  мм. Размеры пучка на поверхности материала:  $A = 1,5$  мм,  $B = 1,5$  мм. Плотность мощности лазерного пучка  $P$  на поверхности кварцевой пластины составляет  $5 \text{ Вт/мм}^2$ .

Оптимальная разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей составила  $19$  нм. Скорость относительного перемещения  $V$  для данной разности хода составила  $2,0$  мм/с. Пластины размещают на координатном столе. Согласно расчетам, расстояние  $S$  от заднего фронта лазерного пучка до места нанесения дефекта составило  $4$  мм, время  $t$  нанесения дефекта -  $2,8$  с. Фокусируют пучок излучения лазера на поверхности пластины и сканируют его по заданной линии разделения, нагревая стекло со скоростью  $2,0$  мм/с. Через время  $t = 2,8$  с после начала нагрева в зону нагрева подают хладагент, например, в виде воздушно-водяной смеси, подаваемой через форсунку диаметром  $0,8-2,2$  мм под давлением  $0,6-4$  атм и одновременно в этой зоне на расстоянии  $S = 4$  мм от заднего фронта лазерного пучка наносят дефект. Расход воды для эффективного охлаждения и создания резкого температурного перепада должен составлять не менее  $0,04$  мл/с. Зону охлаждения перемещают вслед за зоной нагрева, при этом происходит развитие микротрещины. После

# ВУ 14622 С1 2011.08.30

разлома пластины по линии образовавшейся трещины торец имеет зеркально гладкую поверхность, не требующую дальнейшей обработки.

Примеры осуществления заявляемого способа лазерного управляемого термораскалывания хрупкого неметаллического материала представлены в таблице.

Пример	Параметры способа			Результаты испытаний
	Плотность мощности, Вт/мм <sup>2</sup>	Скорость, мм/с	Разность хода, нм	
1	5	1	40	наблюдается крупная посечка на краях микротрещины
2	5	1,4	31	наблюдается мелкая посечка на краях микротрещины
3	5	1,5	30	края микротрещины гладкие и ровные
4	5	2	19	края микротрещины гладкие и ровные
5	5	2,5	11	края микротрещины гладкие и ровные
6	5	2,6	10	микротрещина отсутствует
7	5	3	7	микротрещина отсутствует

Анализируя результаты проведенных экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что заявляемый способ лазерного управляемого термораскалывания хрупкого неметаллического материала обеспечивает надежное развитие микротрещины и позволяет получить изделия с высококачественными торцами, имеющими зеркально гладкую поверхность, не требующую дальнейшей обработки.

Источники информации:

1. Патент РБ 10022, МПК (2006) С 03В 33/00, 2007.
2. Патент РФ 2024441, МПК (2006) С 03В 33/00, 1994 (прототип).