

Лазерное разделение стекла в плоскости, параллельной поверхности

С.В.Шалупаев, Е.Б.Шершнев, Ю.В.Никитюк

Стекло, обладая уникальным сочетанием ряда физико-химических свойств, является одним из наиболее широко применяемых в промышленности материалов. Существующие технологии обработки стекла и других хрупких неметаллических материалов основываются на традиционных методах, сопряженных с большим количеством трудоемких ручных операций, плохо поддающихся механизации и автоматизации.

Лазерные технологии обеспечивают возможность локального нагрева, вызывающего возникновение больших градиентов температур, которые обуславливают возникновение в объеме материала значительных термоупругих напряжений. Высокие значения термоупругих напряжений, превышающих предел прочности и определяют процесс лазерного термораскалывания стекла, лишенный недостатков, присущих традиционным способам обработки. Интересной разновидностью лазерного термораскалывания является параллельное лазерное термораскалывание, которое заключается в возникновении и развитии разделяющей трещины параллельно плоской поверхности обрабатываемого материала. Изучению проблемы разделения хрупких неметаллических материалов лазерными методами посвящено большое количество работ (например [1], и, в частности, проблеме параллельного лазерного термораскалывания [2]). Однако в связи с возросшими возможностями компьютерной техники и развитием численных методов представляется целесообразным дальнейшее экспериментальное и теоретическое изучение механизма процесса параллельного лазерного термораскалывания, дающее возможность нахождения оптимальных режимов, обеспечивающих высокое качество и производительность обработки.

Экспериментальные исследования были проведены авторами на лабораторной установке с CO_2 -лазером с выходной средней мощностью 35 Вт, работающим в непрерывном режиме, координатным столом с программным управлением и оптико-механическим устройством энергетического канала излучения.

Необходимым условием качественной реализации процесса термораскалывания стекла параллельно поверхности является наличие направленного снижения его прочности в объеме на некотором расстоянии от поверхности. Одним из возможных вариантов создания таких условий является нанесение в торце стекла надреза. Однако такой способ не обеспечивает надежного зарождения в стекле трещины параллельной поверхности, так как кромка стекла изначально обладает достаточным количеством дефектов, которые создают значительную конкуренцию технологическому надрезу в стекле.

Ранее авторами было установлено [2], что для обеспечения надежности процесса целесообразно инициировать зарождение трещины параллельной поверхности от наклонной микротрещины, полученной с использованием процесса управляемого лазерного термораскалывания стекла с заданными глубиной проникновения и углом наклона микротрещины.

В ходе экспериментальных исследований параллельного лазерного термораскалывания стекла использовался осесимметричный нагрев движущимися пучками эллиптического сечения. При сканировании изделия эллиптическим лазерным пучком, ориентированным малой осью параллельно направлению перемещения лазерного луча относительно стеклянной пластины, от наклонной микротрещины на определенной глубине формировалась трещина, распространяющаяся под пучком на определенной глубине параллельно поверхности образца.

Для выяснения особенностей образования и развития трещины параллельной поверхности был произведен расчет полей температурных напряжений, формируемых в

стекле при его нагреве движущимся лазерным пучком. Решения данной задачи было выполнено с использованием метода конечных элементов.

Как известно, величины теплофизических характеристик стекла в значительной степени зависят от температуры, а при лазерном термораскалывании температура стекла может меняться в широких пределах. Теплопроводность стекла с повышением температуры от 20°C до температуры стеклования увеличивается примерно в 2 раза, а удельная теплоемкость увеличивается примерно в 1,5 раза. Таким образом, для избежания существенных погрешностей в расчетах необходим учет зависимости теплофизических характеристик стекла от температуры. В линейном приближении коэффициент теплопроводности положим равным $\lambda = 0,88 + 0,0012 \cdot T \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, а удельную теплоемкость — $c = 860 + 0,445 \cdot T \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

Плотность стекла ρ примем равной $2450 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, модуль упругости — $E = 69 \cdot 10^9$ МПа, коэффициент Пуассона — $\nu = 0,221$, коэффициент температурного расширения $\alpha = 5,8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$; толщину пластины $h = 2$ мм, скорость относительного перемещения лазерного луча и стеклянной пластины $V = 16 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Расчеты проводились при следующих параметрах эллиптического лазерного пучка: большая ось $B = 8 \cdot 10^{-3}$ м, малая ось $A = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м, плотность мощности излучения $P_0 = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Расчет термонапряжений был выполнен в квазистатической постановке, что означает значительно более быстрое установление напряженного состояния, чем теплового равновесия. Погрешность в определении величины термонапряжений, связанная с пренебрежением инерционными эффектами, оказывается очень малой [3].

На рисунке 1 представлены температурные поля, формируемые в исследуемом образце. Сплошные линии определяют изотермы с указанными на рисунках значениями температур. При рассматриваемом технологическом режиме температура исследуемого образца не превышает значений температуры стеклования, что является необходимым условием качественного разделения стекла методом лазерного термораскалывания.

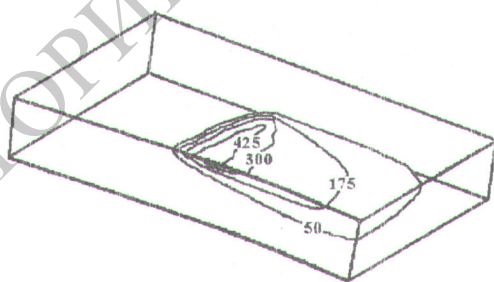


Рис. 1. Распределение температурных полей, $^{\circ}\text{C}$.

На рисунках 2–4 представлены поля температурных напряжений, формируемые в исследуемом образце в результате лазерного воздействия. Из представленного на рисунке 2 пространственного распределений напряжений ε_{33} , действующих в направлении, перпендикулярном поверхности образца, следует, что перед центром эллиптического лазерного пучка формируется зона сжимающих напряжений, величины которых недостаточно для разделения материала. В глубине материала позади от центра эллиптического лазерного пучка формируется зона растягивающих напряжений, величина которых может превысить предел прочности стекла и привести к образованию трещины. Как отмечалось выше, для увеличения вероятности образования трещины параллельной поверхности целесообразно инициировать ее зарождение от наклонной микротрещины, расположенной на соответствующей глубине. Прочность стекла при

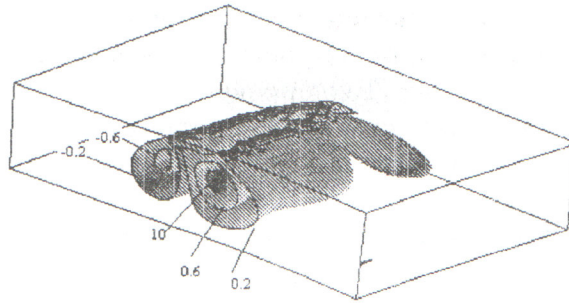


Рис. 2. Распределение полей напряжений s_{33} , МПа.

наличии наклонной микротрещины резко падает, и, таким образом, величины растягивающих термонапряжений расположенных в глубине материала будет достаточно для начала процесса терморасслоения. Управляемость процессом параллельного лазерного термораскалывания обеспечивают сжимающие напряжения, опоясывающие зону растягивающих напряжений. Трещина, зародившись немного позади центра пучка в зоне растягивающих напряжений (при $x=A/2$ (см. рис. 3)), скачком достигает зоны сжимающих напряжений ($x \approx -A/2$) и в дальнейшем перемещается со скоростью движения лазерного пучка.

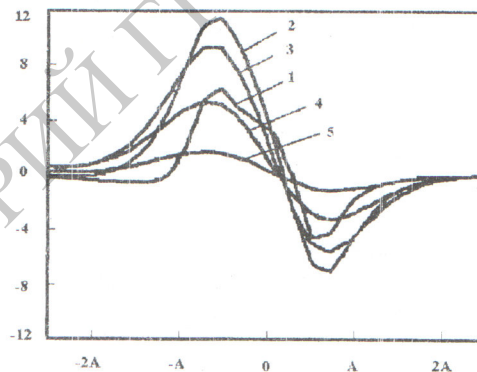


Рис. 3. Зависимость напряжений s_{33} от расстояния до центра эллиптического лазерного пучка ($Y = 4$ мм) 1 - $Z=0.2$ мм, 2 - $Z=0.5$ мм, 3 - $Z=0.8$ мм, 4 - $Z=0.11$ мм, 5 - $Z=0.13$ мм, МПа

Как видно из рисунка 3, максимальных значений растягивающие напряжения достигают на глубине 0.5 мм, слой стекла именно такой толщины отделяется от образца при экспериментальной реализации рассматриваемого технологического режима. Сжимающие напряжения не дают неконтролируемо распространяться трещине в направлении, перпендикулярном движению лазерного пучка. Однако по мере роста значения координаты Y зона максимальных растягивающих напряжений приближается к поверхности образца, что приводит к появлению стрел прогиба у наблюдаемых на эксперименте разделяющих трещин. Подобное распределение растягивающих напряжений в направлении оси OY и небольшой загиб профиля трещины к поверхности приводит к тому, что

при отклонениях от оптимального режима параллельного термораскалывания уменьшается толщина отделяемого слоя и процесс вырождается в снятие стеклянной стружки с овальным профилем.

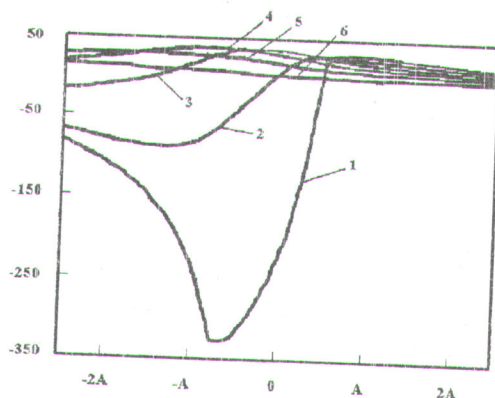


Рис. 4. Зависимость напряжений s_{22} от расстояния до центра эллиптического лазерного пучка ($Y=0$ мм) 1 - $Z=0$, 2 - $Z=0.2$ мм, 3 - $Z=0.4$ мм, 4 - $Z=0.6$ мм, 5 - $Z=0.8$ мм, 6 - $Z=1.1$ мм, МПа

Как видно из рисунка 4, напряжения s_{22} на поверхности достигают значений более 250 МПа. Однако в отличие от s_{33} они являются сжимающими, а прочность стекла на сжатие на порядок выше, чем на растяжение. Кроме того, лазерный пучок имеет форму эллипса, ориентированного малой осью по направлению перемещения. Таким образом, площадь эффективного воздействия напряжения s_{33} и результирующая нагрузка в направлении, перпендикулярном поверхности образца, выше, чем в вертикальной плоскости, проходящей через малую ось эллиптического лазерного пучка. При этом процесс сквозного термораскалывания составляет значительную конкуренцию процессу параллельного термораскалывания. На практике это проявляется в том, что даже при небольших отклонениях от заданного режима параллельное термораскалывание переходит в сквозное.

Исследованный метод лазерного термораскалывания стекла может представлять большой интерес для получения тонких плоскопараллельных пластин, так как позволяет исключить трудоемкие операции шлифования и полировки стекла по плоскости до заданной толщины.

Литература

- [1] Г. А. Мачулка, *Лазерная обработка стекла*, М.: Сов. радио, 1979. - 136 с.
- [2] В. А. Емельянов, В. А. Зайцев, С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнева *Лазерное параллельное термораскалывание хрупких неметаллических материалов*, *Лазерные новости*. 1996. - Вып. 3. - с. 37-41.
- [3] В. Новацкий, *Теория упругости*, М.: Мир, 1975. - 872 с.