

ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.791

ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ КРОМКИ СТЕКЛА

© 2009 г. В. С. Кондратенко*; П. Д. Гиндин*; О. В. Трубиенко*; Hsu Muchi**;
Alexander Naumov**

* Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва

** “Foxconn Technology Group Ltd.”, Китай

E-mail: vsk1950@mail.ru

В работе приведены результаты исследований, в которых показано влияние различных способов резки стекла на механическую прочность края. Установлено, что раскрой стекла методом лазерного управляемого термораскалывания обеспечивает повышение прочности стекла в 5,5 раза по сравнению с механической резкой.

Ключевые слова: термораскалывание, концентраторы напряжений, механическая прочность.

Коды OCIS: 350.3390

Поступила в редакцию 02.10.2009

В процессе эксплуатации различные изделия из стекла подвергаются статическим, динамическим или ударным механическим и термическим воздействиям. На практике наиболее часто на плоские изделия из листового стекла в процессе эксплуатации воздействуют изгибающие или растягивающие нагрузки. Когда кромка стекла попадает в зону действия растягивающих напряжений, возникает опасность разрушения всего изделия из-за наличия на кромке концентраторов напряжений, которыми являются микротрещины и нарушенный после механической обработки поверхностный слой стекла.

Проведенные в испытательном центре “Самарастройиспытания” исследования по оценке прочности образцов стекла размером 800×800×4 мм, используемого в светопрозрачных конструкциях, показали, что при поперечном изгибе равномерно распределенной нагрузкой разрушение стекла начиналось от края образцов в угловых участках. В средней части некоторые образцы имели неразрушенные фрагменты [1].

Таким образом, прочность кромки стеклоизделия имеет первостепенное значение для прочности всего изделия при механических и термических нагрузках. До недавнего времени обработка края стекла осуществлялась преимущественно механическими способами, а именно: скрайбированием твердосплавными роликами или алмазными резцами, алмазно-абразивной обработкой кромки.

С появлением первых оптических квантовых генераторов последовали попытки их применения в качестве режущего инструмента.

Первые работы по лазерному термораскалыванию стекла появились более 30 лет назад [2, 3]. Они вызвали интерес к новому методу лазерной размерной резки благодаря высокой чистоте процесса, основанной на безотходности разделения, а также благодаря высокому качеству кромок. В то время был известен лишь один метод лазерного термораскалывания – это сквозное термораскалывание. В процессе последующих исследований и попыток его промышленного применения был обнаружен ряд серьезных недостатков, ограничивающих производительность и точность раскроя. Их преодоление оказалось задачей сложной и трудноразрешимой. По этой причине метод лазерного термораскалывания был отнесен к числу бесперспективных [4].

С появлением нового способа резки хрупких неметаллических материалов методом лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) [5, 6] появилась возможность получения бездефектной кромки с повышенной механической прочностью по сравнению с традиционными методами обработки. Основные преимущества метода ЛУТ перед остальными известными методами прецизионного раскроя материалов следующие:

– повышение механической прочности изделий в 2,5–5 раз за счет отсутствия концентраторов напряжений и микродефектов вдоль линии реза,

- безотходность ЛУТ, обеспечивающая исключительно высокую чистоту процесса резки,
- высокая скорость резки до 1000 мм/с,
- нулевая ширина реза,
- высокая точность резки.

Учитывая эти преимущества, метод ЛУТ был успешно внедрен при раскрое флоат-стекла [7]. В качестве источников лазерного излучения были использованы различные СО₂-лазеры, в том числе отечественного производства ИЛГН-802 (“Корд”) мощностью 100 Вт и ЛГ- 25 мощностью 50 Вт. Излучение лазера фокусировалось на поверхность стекла с помощью двухлинзового цилиндрическо-сферического объектива. Был выбран оптимальный вариант длиннофокусного объектива, обеспечивающий формирование эллиптического пучка на поверхности стекла с размерами (40–60)×(1,5–2,5) мм.

Важную роль в ЛУТ играет хладагент. В качестве хладагента при резке флоат-стекла использовалась воздушно-водяная смесь, подаваемая в зону нагрева с помощью форсунки специальной конструкции. В данной работе с целью повышения надежности процесса ЛУТ стекла различной толщины была использована многокаскадная щелевая форсунка для подачи хладагента с возможностью независимого управления отдельными каскадами в процессе резки [8]. Этот прием особенно важен при резке предварительно нагретого стекла. Таким образом, было обеспечено надежное термораскалывание всех номиналов флоат-стекла от 4 до 19 мм. Благодаря оптимизации условий нагрева и охлаждения удалось достичь широкого диапазона технологических параметров процесса ЛУТ. Например, процесс термораскалывания стекла успешно осуществляется в диапазоне мощности лазерного излучения от 20 до 100 Вт.

В ходе проведенных исследований прочности при изгибе равномерно распределенной нагрузкой листов с кромкой, полученной в результате раскроя флоат-стекла методом ЛУТ, было установлено, что прочность стекла повышается в 5,5 раза по сравнению с механической резкой [7]. На рис. 1 представлены фотографии образцов стекла, разрушенных при испытаниях на поперечный изгиб, после различных видов резки.

В результате испытаний было установлено, что средняя прочность стекла толщиной 6 мм при различных способах обработки кромок распределялась следующим образом: после механической резки – 18,7 МПа, гладкая кромка – 38,2 МПа, кромка со стороны лазерного реза – 104,3 МПа. Таким образом, прочность

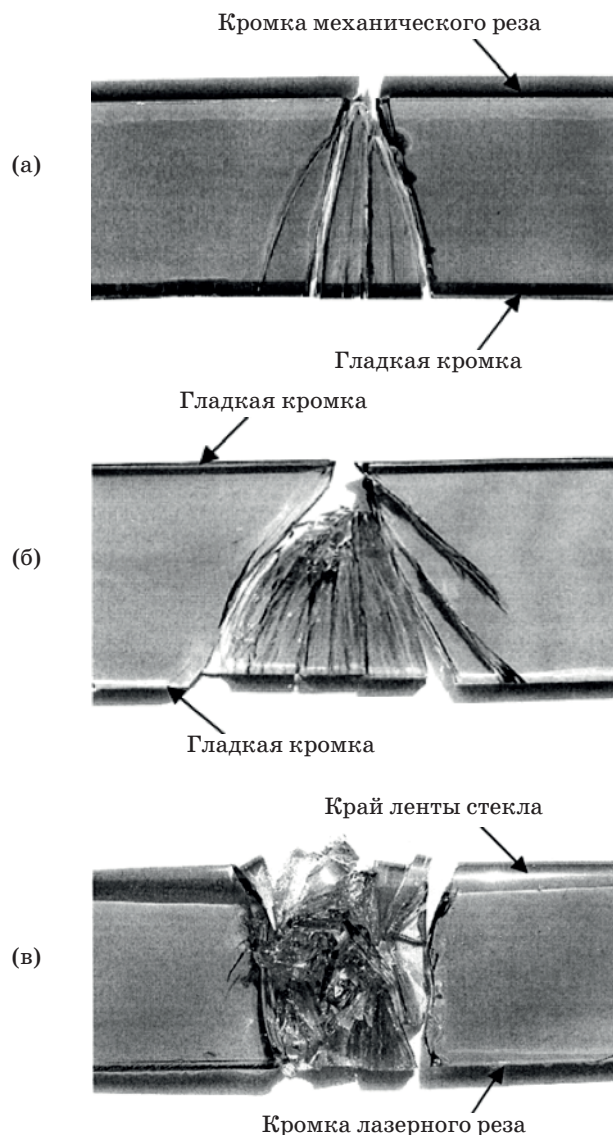


Рис. 1. Характер разрушения образцов стекла после различных видов обработки кромок при испытании на поперечный изгиб. а – образец с кромкой механического реза, б – образец с гладкими кромками, в – образец с кромкой лазерного реза.

кромки стекла после лазерной резки повышается в 5,5 раза по сравнению с прочностью кромки после механической резки и в 2,7 раза по сравнению с прочностью гладкой бездефектной кромки.

На гистограмме (рис. 2) показаны распределения минимальных, средних и максимальных значений прочности края после различных способов резки листового стекла. Как следует из представленной гистограммы, метод ЛУТ обеспечивает 11-кратное превышение минимального значения механической прочности по

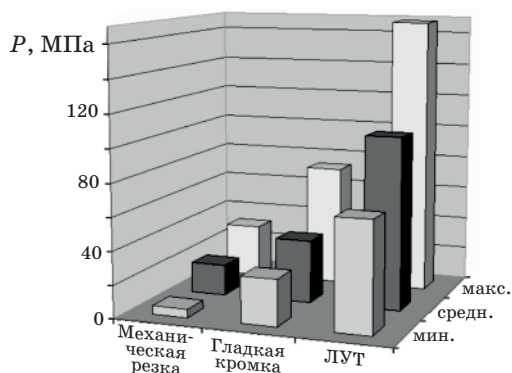


Рис. 2. Прочность стекла при различных способах резки.

сравнению с прочностью при механической резке и более чем пятикратное повышение средних и максимальных значений прочности.

Испытания прочности при поперечном изгибе изделий из стекла для плоских дисплейных панелей проводились совместно с компанией “Foxconn Technology Group Ltd.” в соответствии с действующими стандартами. На рис. 3 представлены фотографии стенда для испытания на поперечный изгиб защитных дисплейных экранов.

В данной работе были проведены исследования влияния режимов ЛУТ на прочностные характеристики края стекла. В качестве источников лазерного излучения были использованы CO_2 -лазеры мощностью 50 Вт. На рис. 4 показаны зависимости прочности кромки от скорости ЛУТ для различных значений мощности лазерного излучения. Как видно из представленных графиков, наиболее высокая прочность кромки достигается при максимальной скорости ЛУТ. В данном случае исключается появление остаточных термических напряжений вдоль линии реза, которые приводят к разупрочнению стекла.

Как следует из результатов измерений прочности (рис. 2), даже после ЛУТ обе кромки имеют разные значения прочности, а именно: прочность со стороны ЛУТ более, чем в 2 раза превышает прочность противоположной, гладкой кромки стекла. Поскольку гладкая кромка также не имеет никаких механических повреждений, то единственным объяснением факта увеличения прочности кромки после ЛУТ является упрочнение кромки стекла в процессе ЛУТ. В данной работе разработан новый способ резки методом ЛУТ, обеспечивающий одинаковую максимальную прочность кромки с обеих сторон.

В ряде случаев при изготовлении различных изделий из стекла возникает необходимость притупления острых кромок. Традиционной технологией притупления кромок, или снятия фасок, является притупление с помощью алмазно-абра-

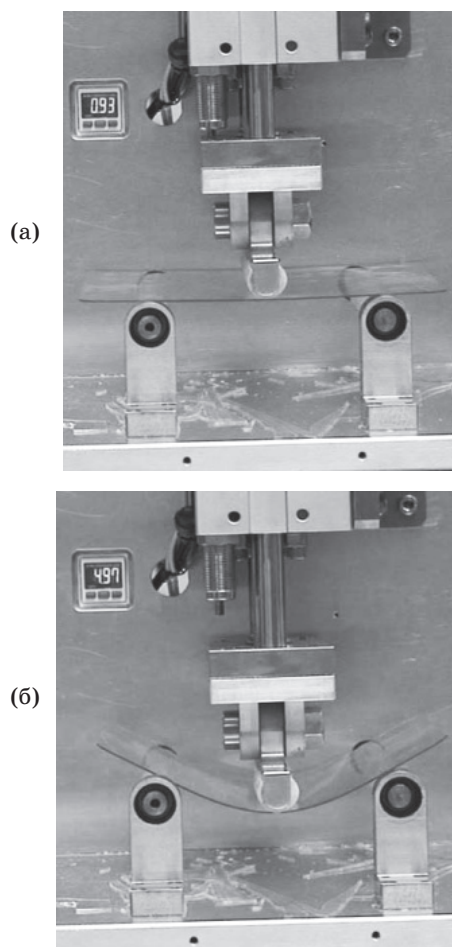


Рис. 3. Стенд для испытаний изделий из стекла толщиной 1 мм (защитный экран дисплея) на поперечный изгиб. а – максимальная прочность после механической обработки кромки 93 МПа, б – максимальная прочность после ЛУТ 497 МПа.

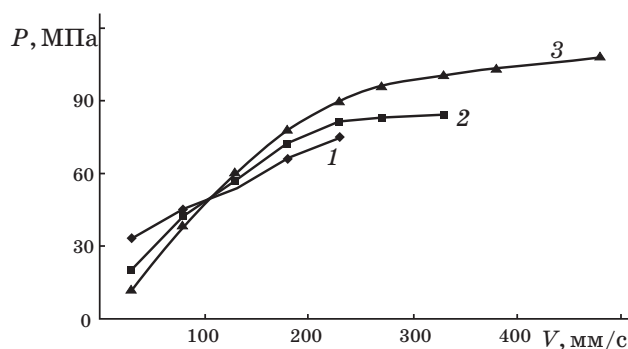


Рис. 4. Зависимости прочности кромки стекла со стороны ЛУТ от скорости при разных мощностях лазерного излучения. 1 – 30 Вт, 2 – 60 Вт, 3 – 100 Вт.

живного инструмента. Недостатками данного способа помимо низкой производительности являются низкая культура производства и загрязнение изделий продуктами шлифования, а также низкое качество получаемых кромок изделий, связанное с наличием большого количества микротрещин и нарушений слоя в зоне обработки. Если подвергнуть кромку стекла после лазерной резки притуплению с помощью алмазно-абразивного инструмента, то все преимущества новой технологии ЛУТ теряются из-за разупрочнения кромки, а также загрязнения рабочей поверхности изделия.

Эта проблема была решена за счет разработки нового способа лазерного притупления острых кромок [9]. Были исследованы [10] зависимости скорости снятия фаски от мощности лазерного излучения и размеров фаски от скорости снятия фаски и мощности лазерного излучения (рис. 5). Однако в этой работе не рассматривалось влия-

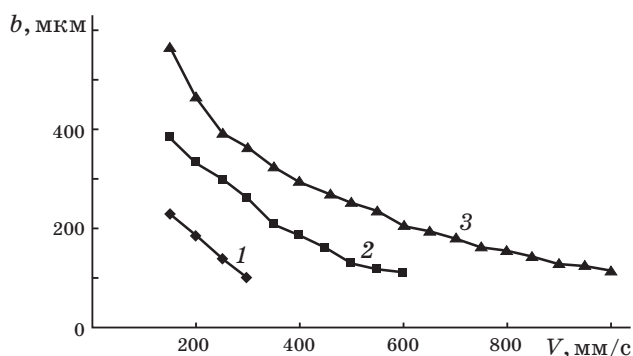


Рис. 5. Зависимости ширины фаски от скорости перемещения лазерного пучка при различных мощностях лазерного излучения. 1 – 30 Вт, 2 – 60 Вт, 3 – 100 Вт.

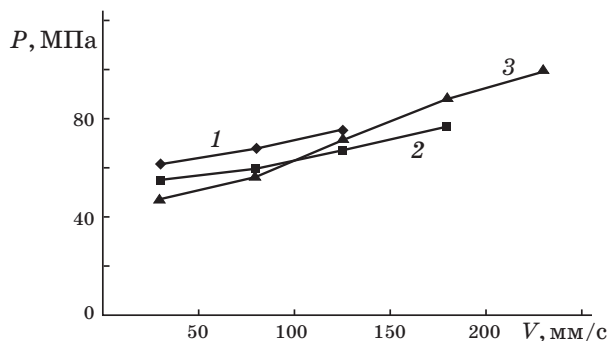


Рис. 6. Зависимости прочности кромки после лазерного притупления от скорости снятия фаски при разных мощностях лазерного излучения. 1 – 30 Вт, 2 – 60 Вт, 3 – 100 Вт.

ние режимов лазерного притупления острых кромок на прочность изделия. В данной же работе приводятся результаты исследований влияния режимов ЛУТ на прочность стекла, а именно: влияние скорости снятия фаски и мощности лазерного излучения на прочность кромки.

Установлено, что режимы лазерного притупления кромок существенно влияют на прочность кромки. На рис. 6. показаны зависимости прочности кромки от скорости снятия фаски при различных значениях мощности лазерного излучения. Установлено, что при последовательном увеличении мощности лазерного излучения и, соответственно, скорости снятия фаски повышается прочность края стекла.

На прочность изделий из стекла влияет не только прочность кромки изделия, но и прочность поверхности, которую можно определить с помощью центрально-симметричного изгиба. Как уже было сказано выше, бездефектность кромки обуславливает повышение ее прочности (гладкая кромка). Дополнительная термическая закалка кромки при ЛУТ (нагрев–охлаждение) обеспечивает увеличение прочности кромки в 5,5 раза по сравнению с механической резкой.

Заключение

В результате проведенных исследований определены пути получения обеих кромок стекла с равной максимальной прочностью, установлено существенное влияние режимов ЛУТ на прочность кромки. В частности, показано, что в зависимости от скорости ЛУТ прочность может изменяться в 10 раз. Максимальная скорость ЛУТ обеспечивает предельно высокие значения прочности.

Получены новые данные по лазерному притуплению острых кромок изделий из стекла. Установлено влияние режимов лазерного снятия фасок на прочность кромки. Впервые показана возможность лазерного упрочнения кромки стекла, включая упрочнение кромки с фаской. Определена возможность упрочнения лазерной фаски до значения, соответствующего прочности кромки после ЛУТ. Полученные результаты показывают возможности применения метода ЛУТ, лазерного снятия фасок и упрочнения кромок при изготовлении самого широкого класса изделий из стекла и других хрупких неметаллических материалов.

Результаты исследований внедрены в ряде отечественных и зарубежных компаний при резке стекла в процессе его выработки, при резке

стекла для дисплейных панелей и при резке покровных стекол для солнечных батарей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кондратьева Н.В.* Экспериментальные исследования прочности листового стекла при поперечном изгибе // *Стекло и керамика*. 2006. № 2. С. 5–7.
2. *Lumley R. M.* Controlled separation of brittle materials used a laser // *J. Amer. Cer. Soc.* 1969. V. 48. № 9. P. 850.
3. *Мачулка Г.А.* Лазерная обработка стекла. М.: Советское радио, 1979. 134 с.
4. *Реди Д.* Промышленные применения лазеров. М.: Мир, 1981. 462 с.
5. *Белоусов Е.К., Кондратенко В.С., Чуйко В.В.* // А. с. № 708686. МКИ⁴ C03 В 33/02. 1977.
6. *Кондратенко В.С.* Способ резки хрупких материалов // Патент РФ № 2024441. 1992.
7. *Жималов А.Б., Солинов В.Ф., Кондратенко В.С., Каплина Т.В.* Лазерная резка флоат-стекла в процессе его выработки // *Стекло и керамика*. 2006. № 10. С. 3–5.
8. *Kondratenko V. S.* Cutting method for brittle non-metallic materials (two variants) // International patent (WO03/010102).
9. *Кондратенко В.С.* Способ притупления острых кромок изделий (Варианты) // Патент РФ № 2163226. 2000.
10. *Кондратенко В.С., Борисовский В.Е., Гиндин П.Д., Наумов А.С., Седаева Н.Р.* Лазерное притупление острых кромок // *Приборы*. 2005. № 12. С. 37–41.