Особенности технологии лазерной обработки слоистых материалов

В. П. Котляров

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, корпус 19, г. Киев, 01056, Украина, e-mail: kotlyarovv@ukr.net

Рассмотрены проблемы качества лазерной обработки изделий из слоистых материалов натурального и искусственного происхождения (слюда, термопласты, реактопласты, фольгированные листы и композиционные материалы). К основным недостаткам операций лазерной обработки (контурного вырезания и прошивки отверстий) относятся расслоение материала у обработанных кромок изделий, его оплавление и деструкция. Причины их возникновения связаны с неоптимальными условиями облучения и режимами обработки, выбранным механизмом разрушения материала заготовки в применяемых схемах технологических операций. Теоретические и экспериментальные исследования процесса обработки разнообразных слоистых материалов позволили сформулировать и реализовать принципы их качественной обработки. Приведены режимы и результаты размерной обработки изделий из слюды, фольгированного стеклотекстолита и гибридного композиционного материала.

УДК 621.375.826:621

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных отраслях науки и техники, в частности в радиоэлектронике, в полиграфии, широко применяются слоистые материалы (природные и искусственные) для изготовления элементов конструкций, в том числе печатных форм, а также в качестве диэлектрических, изоляционных и материалов с гибридными свойствами. Их перечень постоянно расширяется, так как они упрощают и облегчают конструкцию изделия, удешевляют изготовление и повышают его эксплуатационные характеристики и долговечность.

Класс природных (натуральных) слоистых материалов наиболее полно представляет слюда: некоторые детали волноводных устройств (нагрузки фазовращателей, поглотители) изготавливаются из тонколистовой слюды толщиной 0,01–0,08 мм, в то же время в качестве окон высокотемпературных вакуумных камер для напыления пленок применяют заготовки толщиной > 0,5 мм. Существующие методы вырезки изделий из листовой слюды (в основном механообработкой: штамповкой на беззазорных штампах, резкой на гильотинных ножницах, а также лезвием безопасной бритвы зажатых между шаблонами заготовок) характеризуются низкой производительностью, большим количеством бракованных изделий (до 90%) и недостаточной стойкостью режущего инструмента (лезвийного и штампового). Основной причиной брака является расслоение слюды у кромок реза (краев изделия) из-за возникающих при разрезании тангенциальных напряжений между слоями заготовки, а это приводит к существенному утолщению изделия (в десятки раз), что недопустимо в радиотехнических устройствах, или к потере прозрачности вырезанных окон вдоль их периметра. [1]. При контурном вырезании изделий пучком лазерного излучения несколько сокращается протяженность дефектной зоны, однако последняя не устраняется полностью при традиционных схемах вырезания даже в результате оптимизации режима облучения. Подобные сложности встречаются при лазерной обработке других природных слоистых материалов с подобной формой непрочной связи между слоями – диффузией и хрупкостью их материала.

В классе искусственных слоистых материалов [2] последние более разнообразны по свойствам. В качестве конструкционных и изоляционных материалов применяют слоистую термореактивную пластмассу (реактопласт) – композиционные материалы (КМ) на основе полимерного связующего с послойным расположением армирующего наполнителя. Связующими являются синтетические смолы, кремнийорганические полимеры, полиимиды, полиамиды, фторопласт, полисульфон и др. Наполнителями служат: бумага и картон из целлюлозных (гетинакс), синтетических (органопластика), асбестовых (асбопластики) и других волокон; ткани из хлопчатобумажных, стеклянных, асбестовых (текстолиты), углеродных (углепластики), синтетических и других волокон. Широко применяются гибридные КМ, например алюминий-бор. В последнем алюминий выступает в качестве связующего (рис. 1), а волокна бора – армирующего наполнителя (диаметр волокон – 0,2 мм). Причем матрица (Al) составляет 55%, а наполнитель – 45%. Для изготовления печатных плат радиотехниче-

ских и электронных изделий листы из пластмассы покрываются фольгой из меди (с одной, обеих сторон) или ею перемежают слои для формирования многослойных систем. К этому классу материалов относится также двухслойная термопластичная пластмасса в виде интерьерных плит GRAVOPL, METALLEX, плит для гравирования GRAVOGRAPH, которые изготавливаются методом экструзии из оргстекла (акрила) марки ″AKRYLON XT″ или полистирола со слоями разного цвета. Конкурирующими методами изготовления изделий из этих материалов являются механическая обработка (фрезерование – для операций контурной вырезки изделий и их поверхностной обработки в режиме гравирования) и лазерная контурная обработка в тех же операциях. При использовании каждого из методов необходимо решать проблемы, вызванные анизотропностью механических и теплофизических свойств слоистых материалов из-за композиционного строения и различием свойств их составляющих (связующих и наполнителей или слоев). На качество результатов технологической операции также оказывают влияние вид и свойства связи между составляющими материалами, а для лазерной обработки – их оптические свойства (плотность и спектр поглощения) и порядок расположения.

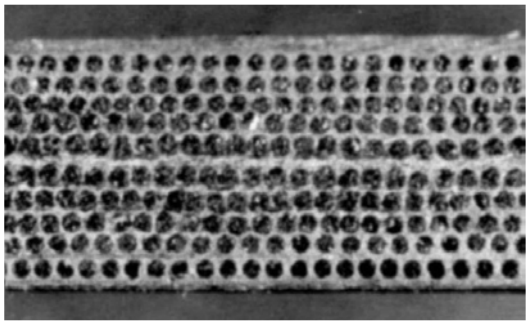

Рис. 1. Поперечное сечение гибридного КМ Al-B толщиной 3,15 мм (диаметр волокон бора 0,2 мм, Al – 55%, B – 45%).

Для оптимизации операций лазерной обработки слоистых материалов на основе анализа процесса взаимодействия лазерного излучения с материалом необходимо:

- выбрать механизм разрушения составляющих компонентов;
- установить необходимый режим подачи лучистой энергии;
- разработать алгоритм проектирования технологической операции, включая схему облучения и режимы обработки, а также дополнительные методы воздействия на материал для достижения заданных технологических показателей (в случае необходимости);
- подобрать технологический лазер по длине волны излучения, энергетическим, временным и пространственным характеристикам пучка;
- скомпоновать технологический модуль для реализации разработанной операции;
- разработать средства дополнительного совершенствования операции (в случае необходимости).

Анализ обрабатываемости слоистых материалов пучком лазерного излучения

В технологии контурной лазерной резки применяют один из двух механизмов разрушения материала в зоне облучения: испарение с самоудалением продуктов разрушения повышенным давлением паровой фракции и плавление с удалением продуктов разрушения дополнительным технологическим инструментом – струей газа, подаваемой в зону облучения соосно с лазерным лучом или под углом. Последний механизм, используемый при сквозном разрезании заготовки, эффективен и характеризуется умеренным расходом энергии, так как удельная энергия плавления существенно ниже энтальпии кипения. Причем медленный темп нагревания материала вызывает растекание тепла за пределы зоны облучения, что отрицательно сказывается на характеристиках реза – ширине и ее стабильности, его поперечной форме. Поэтому такой механизм разрушения обычно применяется в заготовительных операциях, например для вырезки изделий из листовой заготовки. Однако в последнее время механизм “плавление-вымывание” получил неожиданное развитие в операциях прошивки сверхглубоких отверстий ($l/d > 20$) [3], что основано на возможности обеспечения на дне обрабатываемого отверстия уровня интенсивности излучения, достаточной для плавления материала [4]:

$$I_p \geq W_p^{\text{пл}} \Big/ A = kT_{\text{пл}} \Big/ 2A\sqrt{a\tau} \qquad (1)$$

(где $W_p^{\text{пл}}$ – плотность мощности теплового источника, созданного в результате лазерного облучения; A – коэффициент поглощения поверхности заготовки; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления; k – теплопроводность; a – коэффициент температуропроводности ее материала) – практически на неограниченной глубине за счет зеркального отражения пучка излучения от стенок отверстия и удаления расплава с его дна соосной подачей струи газа давлением более 2 МПа. Рассмотренный механизм разрушения материала можно применять для обработки термопластичных пластмасс, слюды, некоторых композиционных материалов (КМ), у которых теплофизические свойства связки и наполнителя мало различаются. В этом случае исключается одна из причин расслоения материала изделия – высокое давле-

ние в зоне облучения при создании предпосылок для оплавления кромки изделия, что предупреждает их расслоение при дальнейшей эксплуатации.

Обработка с длительным импульсным воздействием излучения на слюду ($\tau \approx 0{,}5$–1 мс) или при непрерывном облучении может повысить влияние бокового теплоотвода, в результате чего поверхность стенок реза оплавится, искажая форму реза, вдоль последнего образуется валик переплава, увеличивающий толщину изделия. Последнее не допускается для изделий из слюды, выполняющих функции изоляторов в радиоизмерительных приборах, однако может быть разрешено для смотровых люков.

Для размерной обработки щелей, пазов, вырезки карманов, окон чаще применяют испарительный механизм разрушения материала, который достигается при временно́й и пространственной локализации зоны облучения для создания в ее пределах необходимого уровня интенсивности, что в соответствии с (1) возможно при существенном сокращении длительности облучения (длительности импульса τ). Это условие также способствует уменьшению ширины зоны термического влияния ($z_{\text{тв}} \approx 4\sqrt{a\tau}$), следовательно, протяженности измененной структуры и состава материала. Такой режим облучения должен поддерживаться в течение всей операции как вдоль вырезаемого контура изделия, так и по его толщине. Для заготовок со слоями, имеющими сходные теплофизические и оптические свойства, например из акрила или полистирола разных цветов, но одной оптической плотности, последнее условие обеспечивается стабильностью режима облучения и скорости относительного перемещения. Разнородные по составу заготовки, особенно из материалов с анизотропными свойствами, такие как фольгированный стеклотекстолит, гетинакс, углепластик, КМ, например гибридный КМ Al-B, не могут быть обработаны достаточно качественно в этом режиме по традиционным технологическим схемам из-за сложности зависимого управления интенсивностью в зоне облучения. Поэтому при режиме, рассчитанном для материала наиболее “стойкой” составляющей компоненты, например наполнителя, избыточная концентрация энергии за его пределами приведет к взрывообразному разрушению остальных составляющих с образованием скачков уплотнения за пределами зоны облучения и деструкции соседних слоев: отслоению фольги, расслоению пластика, инициации экзотермических реакций. В однородных по составу, но анизотропных по свойствам материалах, таких как упоминавшиеся слюда, сланцы, при избыточном уровне интенсивности в зоне облучения интенсифицируется процесс испарения, и высокое давление паров (до 10–15 МПа) может спровоцировать формирование термоупругих напряжений, которые даже за пределами зоны термического влияния могут превысить допустимый предел касательных напряжений по плоскостям спайности и привести к расслоению слюды, а значит, к многократному увеличению ее толщины и потере прозрачности.

Результаты экспериментальных исследований процесса лазерной обработки слоистых материалов

Цель экспериментов – проверка высказанных предположений, а также определение фактических границ режимов обработки с учетом реальных свойств обрабатываемых материалов. К последним относятся, например, такие их послойные свойства, как однородность, коэффициент поглощения, оптическая плотность, спектр поглощения, которые сложно учесть в вычислительных экспериментах.

Так как в задачи эксперимента также входила процедура оптимизации процесса лазерной обработки на основе его математического моделирования, были использованы традиционная для целей исследований однофакторная организация эксперимента и многофакторные планы с соответствующими методиками [5].

В технологическом оборудовании экспериментов предусматривалось применение разнообразных по своим характеристикам, но общедоступных излучателей – на YAG: Nd^{+3}, Al_2O_3: Cr^{+3}, CO_2 и N_2. Их объединяет импульсный режим генерации с широким диапазоном вариации частоты следования импульсов ν (от 100 Гц до 25 кГц) и возможностью достижения в зоне облучения достаточного для испарительного механизма разрушения уровня интенсивности излучения (до 10^8 Вт/см^2).

Экспериментальная проверка возможностей “мягкого” (и экономного) режима разделения слоистого материала за счет его плавления в зоне облучения лазерным лучом и выдувания из полости реза струей газа показала, что при существенных различиях в теплофизических свойствах слоев текстолита, меди и гетинакса или составляющих и наполнителя в КМ, например Al (k = 221,5 Вт/(м·град)) и B (k = 1,26 Вт/(м·град)), уровень интенсивности, достаточный для плавления первого компонента, приводит к перегреву (вплоть до испарения) на значительную глубину бора и других составляющих, их выгоранию или перераспределению в плоскости реза. При этом возникают недостатки, которые видны на рис. 2, где показана стенка реза гибридного КМ Al-B,

выполненного в газолазерном режиме с кислородом [6]: расплав связки – алюминия – цепляется за перерезанные волокна бора, что снижает качество обработки.



Рис. 2. Вид стенки реза КМ Al-B после лазерного разрезания в газолазерном режиме (толщина заготовки 1,15 мм, λ = 1,06 мкм, P = 300 Вт, p = 0,3 МПа, V = 1,7 мм/с).

На примере контурной вырезки изделий из материала, слои которого имеют одинаковые свойства, например из телевизионной слюды СТА (мусковит с плотностью ρ = =2,69–2,87·10^{-3} кг/м^3, теплопроводностью k = =0,43–0,48 Вт/(м·град), температурой испарения T_k = 1530–1595°С и пределом прочности при растяжении σ_b = 180–350 МПа), была оценена возможность и проанализированы результаты использования режима “плавление-вымывание”. Этот режим достигается:

– при интенсивности в зоне облучения I_p = 4,2×10^5 Вт/см^2, необходимой для нагрева поверхности заготовки до $T \le T_k$;

– для длительности воздействия, достаточной для того, чтобы расплавить заготовку на глубину, равную ее толщине δ (δ = 0,3 мм), $t \ge \tau$ = 1, 5·10^{-4} с;

– при поверхностном поглощении излучения, что для λ = 1,06 мкм достигается окраской поверхности флексографическими чернилами (A = 0,6);

– с продувкой полости реза струей воздуха при его давлении $p \approx$ 0,2 МПа.

Как известно, слюда характеризуется анизотропностью теплофизических свойств в направлении и поперек слоев. Это обстоятельство вызывает асимметричность тепловой задачи, что снижает точность ее решения, однако ею можно пренебречь при оценочных расчетах. При реализации расчетного режима облучения возникающие в прогретой области вокруг зоны обработки тангенциальные напряжения не превышают их предельных уровней по плоскостям спайности слоев слюды, несмотря на анизотропность механических свойств, а значит, не приводят к расслоению материала в ней, а кромка реза оплавляется, предохраняя ее от расслоения в будущем (рис. 3).

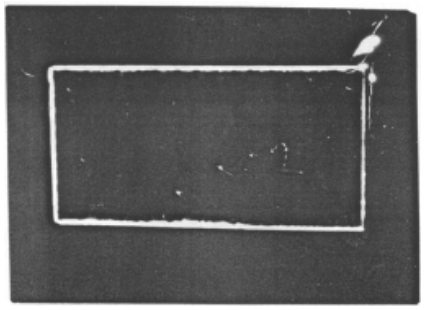

Рис. 3. Смотровой люк (10×20 мм) с оплавленной кромкой.

Для обработки слоистых реактопластов можно использовать только испарительный механизм их разрушения. При попытках лазерной размерной обработки отверстий связи диаметром 0,3–0,5 мм в заготовках плат печатного монтажа, вырезаемых из листового стеклотекстолита марки СТЭФ толщиной 1,55 мм, имеющего двухстороннее покрытие из меди толщиной 0,04 мм, были получены отрицательные результаты. В эксперименте применялась лазерная технологическая установка (ЛТУ) со следующими эксплуатационными характеристиками излучателя на YAG: Nd^{+3}:

– размеры активной среды $d \times l$ = 6×70 мм;

– импульсная энергия излучения $E \in$ $\in$ 0,1÷10 Дж;

– длительность импульса $\tau \in$ 50÷1500 мкс;

– угол расходимости пучка $\theta \in$ $\in$ 0,003÷0,006 рад;

– частота следования импульсов $\nu \in$ $\in$ 0,1÷100 Гц;

– телескоп (афокальный) – увеличение Γ = 2 и 4 раза;

– линза преобразующая с фокусным расстоянием F = 25, 50, 75 и 100 мм.

Технологический режим операции лазерной прошивки отверстий был рассчитан по теплофизическим свойствам меди как наиболее трудно-обрабатываемого материала (E = 3,4 Дж, τ = 240 мкс, θ = 0,005 рад, F = 50 мм (d_0 = 0,25 мм), n = 3 имп., ν = 10 Гц), что обеспечило интенсивность в зоне обработки I_p = =2,9×10^7 Вт/см^2 или плотность мощности теплового источника W_p = 1,15×10^7 Вт/см^2 при A_{Cu} = 0,4. Результаты обработки:

– диаметр отверстия в фольге 0,32 мм;

– диаметр отверстия в стеклотекстолите 0,34 мм, конусообразность 0,14 мм;

– фольга отслоилась от диэлектрика в зоне диаметром 0,6 мм;

– поверхность стенки отверстия покрыта сажей, материал расслоен, толщина заготовки в месте расположения отверстия увеличена на 0,4 мм;

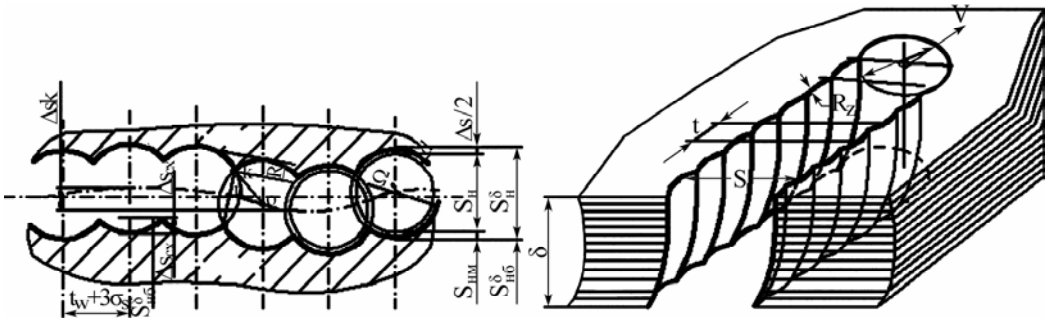

Рис. 4. Схема формирования реза при импульсном облучении.

– общее качество отверстия неприемлемо для формирования проводящей точки между слоями меди, а в отверстии не может быть расположена ножка элемента схемы.

При вырезании изделия из слюды толщиной 0,3 мм в режиме интенсивного испарения излучением YAG–лазера импульсная энергия E = 0,10–0,15 Дж, τ = 100–120 мкс, размер зоны облучения d_0 = 0,1 мм, что при интенсивности в зоне облучения $I_p = 1{,}27\times10^7$ Вт/см^2 и уровне поглощения A = 0,6 позволяет создать тепловой источник с плотностью мощности W_p = = $7{,}64\times10^6$ Вт/см^2. При нормированной шероховатости кромки реза R_z < 3,2 мкм (рис. 4) скорость резки ограничивается величиной V = = 0,035 ν мм/с при сквозной прошивке за один импульс, что следует из зависимости (2):

$$V \le \nu d\left[1-\left(1-\frac{2R_z}{d}\right)^2\right]^{1/2}. \qquad (2)$$

На рис. 5 показаны элементарные резы, выполненные в слюде при их сквозном формировании одним импульсом (V = 12 мм/с). Видно, что протяженность дефектной зоны (расслоения) в несколько раз превосходит ширину реза, поэтому такой режим нельзя применять для вырезания как смотровых люков, так и изоляционных прокладок.

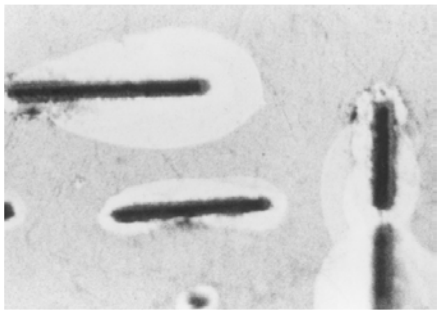

Рис. 5. Примеры сквозных резов слюды (вид в плане), выполненных за один проход при импульсном облучении (толщина 0,3 мм, S = 0,1 мм, λ = 1,06 мкм, $P_{ср}$ = 25 Вт, τ = 100 мкс, V = 12 мм/с).

Таким образом, ни один из рассмотренных механизмов разрушения материала лазерным излучением в известном исполнении технологических операций не может обеспечить желаемый уровень комплекса их показателей.

Оптимизацией режима лазерной обработки можно несколько улучшить качественные и количественные показатели технологической операции. Ее возможности были оценены на примере проектирования оптимальных режимов лазерного разрезания пластины толщиной 2,15 мм из гибридного КМ Al-B [6] с помощью экспериментального метода оптимизации по многофакторной методике. В качестве управляемых факторов выбраны параметры, наиболее сильно влияющие на комплекс качественных и количественных показателей процесса обработки: ширина реза на верхней поверхности заготовки $S_{верх}$, его клиновидность (ширина реза на нижней поверхности $S_{низ}$) и шероховатость стенок R_z. Это линейная скорость резания V, условия облучения ΔF (положение заготовки в каустике пучка излучения), давление технологического газа p (экспериментально установлено, что предпочтительно использовать неактивные газы, например CO_2, Ar и др.) и угол между направлением скорости резания и расположения армирующих волокон β. Остальные параметры на время эксперимента фиксируются на определенных уровнях, причем это сохраняется и для реализации найденного режима в технологической операции.

Для моделирования малоисследованных объектов рекомендуется использовать композиционные квази-D оптимальные планы (табл. 5.14 [5]), например план Хартли на сфере в дробной постановке ядра плана 2^{4-1} с определяющим контрастом 1 = $x_1x_2x_3$. Совместимость уровней (с точки зрения достижения главного технологического эффекта – сквозного разрезания заготовки) проверялась на проблемной границе факторного пространства (V (x_1) $\in$ 5÷25 мм/с; ΔF (x_2) $\in$ $\in$ -0,2÷-1,0 мм; p (x_{3NN}) $\in$ 0,2÷0,4 МПа; β (x_4) $\in$ $\in$ 0÷90°). Установленные в результате эксперимента проверки его предпосылок и статистической обработки полученных данных количественные связи между показателями технологической операции и ее параметрами позволили оце-

нить степень влияния каждого из них, а также парных взаимодействий на показатели качества. С помощью одного из известных методов косвенной оптимизации (неопределенных множителей Лагранжа) была решена многокритериальная задача оптимизации, то есть найдены такие режимы лазерного разрезания, когда минимизируются ширина реза S и его клиновидность ($S_{\text{верх}} - S_{\text{низ}} = 0$), ее зависимость от направления резания по отношению к направлению расположения волокон бора при достижении максимальной производительности (максимальной скорости разрезания V). На рис. 6 показан фрагмент реза на одном из оптимальных режимов.

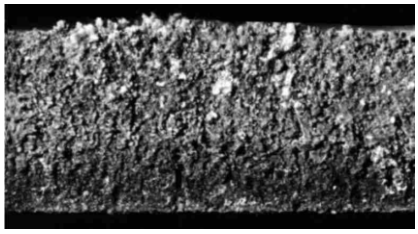

Рис. 6. Фрагмент стенки реза заготовки толщиной 2,15 мм из КМ Al-B.

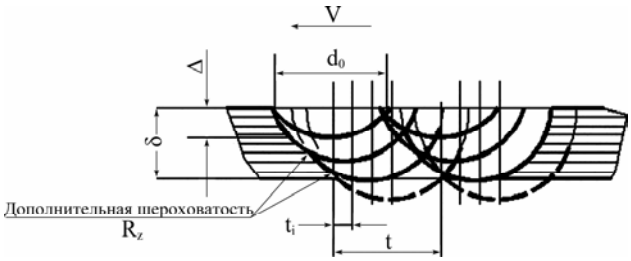

Рис. 7. Схема формирования сквозного реза несколькими импульсами.

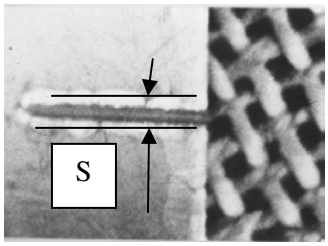

Рис. 8. Пример сквозного разрезания слюды после оптимизации режима обработки (толщина 0,3 мм, S = 0,1 мм, λ = 1,06 мкм, $P_{\text{ср}}$ = 15 Вт, τ = 80 мкс; $V_{\text{мио}} = V\Delta/\delta = V/n$ = = 4 мм/с).

Подобная процедура оптимизации режима вырезания изделий из листовой слюды толщиной 0,01÷0,08 мм позволила минимизировать ширину зоны расслоения материала за счет сокращения длительности импульсов излучения, импульсной энергии и повышения частоты их следования, что привело к схеме многоимпульсной прошивки толщины заготовки $\delta = \Delta n$ (рис. 7). Однако не удалось полностью устранить расслоение (рис. 8), хотя ширина зоны сократилась вследствие уменьшения плотности энергии в зоне облучения и, следовательно, интенсивности парообразования и давления продуктов разрушения. Кроме того, использование излучения с λ = 1,06 мкм, для которого слюда прозрачна, а поглощающее покрытие наносится лишь на поверхность заготовки (то есть работает только с первым импульсом), а энергия остальных поглощается в толщине заготовки (вероятнее, на плоскостях спайности, где находится контраст оптической плотности), приводит к созданию объемного теплового источника с взрывообразным характером разрушения материала, что расслаивает материал заготовки.

Технологические приемы повышения качества лазерной обработки

Как видно из результатов экспериментальных исследований, не все проблемные технологические операции лазерной обработки слоистых материалов можно усовершенствовать оптимизацией режима обработки. Это объясняется тем, что применяемые схемы операций предназначены для лазерной обработки (резки, прошивки отверстий, прорезания пазов) изотропных материалов, тогда как слоистые структуры создают определенные технологические трудности, связанные со слабой межслойной связью и анизотропностью теплофизических свойств материала вдоль и поперек слоев. В этих условиях представляется недопустимым формирование объемных тепловых источников, разрушающих материал взрывообразно при больших уровнях давления в зоне обработки, что способствует его расслоению. Еще более критичны к выбору схемы обработки слоистые материалы с контрастными по механическим, теплофизическим и оптическим свойствам слоями, такие как фольгированные медью (плакированные) диэлектрики (термореактивные пластмассы слоистой структуры) или КМ, особенно гибридные, например Al-B (k_{Al} = = 221,5 Вт/(м·град), k_{B} = 1,26 Вт/(м·град)). Проблема в данном случае возникает уже на уровне выбора режима облучения: каждая из составляющих слоистого материала (связка и наполнители) должна разрушаться в предпочтительном виде (испарении, например), однако одновременно обеспечить этот механизм для разнообразных компонентов невозможно. На основании этого можно утверждать, что для дальнейшего совершенствования технологической операции лазерной обработки слоистых материалов необходимо руководствоваться следующими принципами ее организации:

- для достижения заданного качества результатов лазерной обработки изделия из слоистого материала (как с контрастными, так и схожими

по свойствам материалами слоев) необходимо применять послойное удаление его составляющих;

- для исключения взрывообразного разрушения слоев нужно при облучении каждого из них обеспечить формирование поверхностного теплового источника;
- режимы и условия облучения должны устанавливаться в зависимости от выбранного вида разрушения и удаления материала слоя на основании его соответствующих свойств;
- для реализации рекомендуемой многопроходной схемы операции контурной вырезки (изделий, отверстий в них) затруднено использование нескольких излучателей, каждый из которых оптимален по характеристикам для соответствующей компоненты заготовки, поэтому должны быть предусмотрены технологические мероприятия по обеспечению выполнения перечисленных выше принципов с применением лишь одного лазера;
- при выборе методики оперативного изменения режимов обработки от одного перехода операции к следующему необходимо предусмотреть неизменность размеров и формы инструмента в зоне облучения;
- желательно использовать методы и средства дополнительного, не режимного воздействия на операцию для получения заданного результата операции.

На этом основании в упоминавшуюся выше операцию лазерной прошивки отверстий в плате печатного монтажа необходимо внести следующие изменения:

– использовать лазер с длиной волны излучения, которое поглощается поверхностно медным проводящим слоем и диэлектриком (коэффициент Бугера-Ламберта $\alpha > 10^3$ см$^{-1}$) с достаточной эффективностью (коэффициент поглощения $A \geq 0{,}6$);

– для послойного разрушения материала платы в операции прошивки отверстий ∅ 0,3 мм необходимо использовать метод трепанации вдоль их контура на режимах, достаточных для испарения меди ($I_p > 10^7$ Вт/см^2), и деструкции диэлектрика как за счет разрушения химических связей, так и сублимации ($I_p \in 10^4 \div 10^5$ Вт/см^2), что у последнего “охлаждает” стенки реза, предотвращая обугливание связующего вещества;

– необходимость многократного обхода контура вырезаемого отверстия при неизменном размере пучка излучения на поверхности заготовки определяет метод управления интенсивностью облучения – используя ее зависимость от скорости относительного перемещения пучка излучения и заготовки:

$$V_i = \left[W_E\right]^u d_0 \Big/ \rho_i L_u \delta_i , \qquad (3)$$

где $\left[W_E\right]_i^u$ – критическая по испарению плотность энергии теплового источника ($\left[W_E\right]_{\text{Cu}}^u \approx 4$ Дж/см^2 и $\left[W_E\right]_{\text{СТЭФ}}^u \approx 0{,}1$ Дж/см^2), δ_i – толщина слоя материала, удаляемого за один проход ($\delta_{\text{Cu}} = 25$ мкм, $\delta_{\text{СТЭФ}} = 0{,}25$ мм), ρ_i – плотность ($\rho_{\text{Cu}} = 8{,}92$ г/см^3 и $\rho_{\text{СТЭФ}} = 1{,}8$ г/см^3) и L_i – удельная теплота испарения ($L_{\text{иCu}} = 4{,}8$ кДж/г и $L_{\text{иСТЭФ}} = 0{,}59$ кДж/г).

Наиболее приемлемым для этой операции можно считать газовый лазер на азоте (N_2), излучение которого имеет длину волны $\lambda = 0{,}337$ мкм (УФ область спектра), поглощается поверхностно медью ($\alpha = 10^4$ см$^{-1}$) и стеклотекстолитом СТЭФ ($\alpha \approx 10^3$ см$^{-1}$), причем с достаточной эффективностью ($A_{\text{Cu}} \approx 0{,}6$ и $A_{\text{СТЭФ}} \approx 0{,}7$). Его дополнительным преимуществом можно считать работу на самоограниченных переходах с достижимой мощностью 1 МВт в пичках длительностью 10 нс, частота следования которых достигает 100 кГц, то есть при средней мощности $P_{\text{ср}} > 0{,}5$ кВт.

Таким образом, режимы послойного разрушения материала печатной платы при таком управлении интенсивностью в зоне облучения будут отличаться лишь скоростью перемещения луча вдоль контура отверстия (3):

$$V_{\text{Cu}} = \frac{4 \times 0{,}003 \times 15000}{8{,}92 \times 4793{,}4 \times 0{,}0025} = 1{,}684 \text{ см/с;};$$

$$V_{\text{СТЭФ}} = \frac{4 \times 0{,}003 \times 15000}{1{,}8 \times 593 \times 0{,}025} = 6{,}75 \text{ см/с.}$$

При диаметре отверстия связи ∅ 0,3 мм, толщине слоя меди 0,025 мм с каждой стороны листа стеклотекстолита и толщине последнего $\delta = 1{,}5$ мм время обработки одного отверстия

$$t_{\text{маш}} = 2t_{\text{Cu}} + \frac{\delta}{\delta_{\text{СТЭФ}}} t_{\text{СТЭФ}} =$$
$$= \pi d (2/V_{\text{Cu}} + \delta/(\delta_{\text{СТЭФ}} V_{\text{СТЭФ}})) = 0{,}2c,$$

что при соответствующем технологическом обеспечении позволит обрабатывать до 30 отверстий в секунду. Разработанный метод обработки отверстий в платах печатного монтажа [7] успешно реализуется лазерными технологическими установками (ЛТУ) фирмы LPKF [8], LPKF ProtoLaser и LPKF Laser Drill. На рис. 9 показан профиль отверстия, обработанного на одном из них.

Несущественным отличием является то, что рабочим излучением УФ диапазона служила тре-

тья гармоника излучения лазера на YAG: Nd^{+3} (λ = 0,355 мкм), для выделения которой используется нелинейная оптика с достаточно высокими потерями мощности.

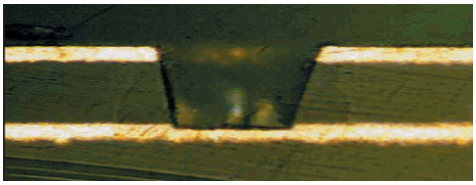

Рис. 9. Профиль отверстия в заготовке печатной платы с послойным разрушением ее слоев.

Режимными средствами также не удалось устранить основной недостаток лазерного вырезания изделий из слюды – ее расслоение по контуру обработки. В соответствии с приведенной концепцией организации операции лазерной обработки слюдяных изделий необходимо, во-первых, избавиться от неуправляемого вида поглощения материалом заготовки лазерного излучения, то есть по границам его слоев. Слюда достаточно прозрачна в диапазоне длин волн излучения от 0,35 до 9,60 мкм, поэтому для устранения формирования объемного теплового источника в теле заготовки необходимо использовать в ЛТУ излучатели УФ или дальнего ИК-диапазона. Из двух типов излучателей, подходящих для операции лазерного вырезания (достаточный уровень мощности, импульсный режим работы с достаточной частотой следования импульсов (более 10 кГц)), а именно лазера на CO_2 модели ЛГИ-50-3 (λ = 10,6 мкм, $P_{ср}$ = 10 Вт, $\nu \in$ 0,1÷15 кГц) и N_2 – лазера ЛГИ-505 (λ = 0,337 мкм, $P_{ср}$ = 20 Вт, $\nu \in$ 0,1÷100 кГц), предпочтительнее последний из-за самостоятельной организации импульсного характера генерации (лазер на самоограниченных переходах), лучших пространственных характеристик пучка излучения, что позволяет острее концентрировать его энергию, и большей фотонной энергии, что позволяет уменьшить удельный вклад энергии и ограничить размер дефектной зоны.

Однако выполнение и этого условия не приводит к полному устранению дефектной зоны за счет существенного снижения производительности операции в связи с тем, что послойное разрушение слюды реализовать практически невозможно из-за неопределенности расположения границ слоев (см. рис. 7) и вынужденного увеличения по этой причине количества проходов. Для устранения этой неопределенности и зависимости результатов операции от случайных факторов разработан и исследован способ контурного разрезания диэлектрических материалов, имеющих слоистое строение, в предварительно обжатом состоянии. С этой целью ранее предпринимались попытки обжима заготовки перед ее обработкой, в том числе лазерным лучом, например накладками с двух ее сторон или обдувом струями газа. Однако эти приемы загромождают рабочую зону, затрудняют доступ пучка излучения к обрабатываемой поверхности и малоэффективны, так как напрягают структуру заготовки вне зоны воздействия инструмента. В предлагаемом способе контурного разрезания диэлектрических материалов [9], имеющих слоистое строение, заготовку *1* перед установкой в позицию II для облучения пучком излучения *2* (рис. 10), сфокусированным линзой *3*, электризуют с поверхности на I позиции, располагая через диэлектрическую прокладку *9* (например, пленка из фторопласта) на подложке *4* с полированной поверхностью (R_z < 1 мкм) из теплопроводного, хорошо отражающего излучение материала (медь, алюминий, серебро и пр.). Для нанесения заряда можно использовать источник коронного разряда. Тогда изолированный стол ЛТУ с подложкой *4* подключают к отрицательной клемме источника тока *8*, с которой также соединяется корпус *5* разрядника. Центральный его электрод *6* несет положительный заряд, который переносится на поверхность заготовки, перемещающейся под разрядником со скоростью *V* перед установкой в позицию II.

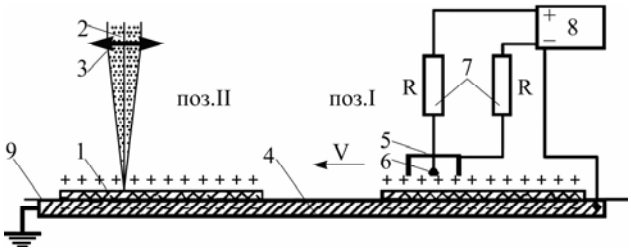

Рис. 10. Схема способа лазерной резки слюды с предварительным ее обжимом.

Для материала с высокими диэлектрическими свойствами, находящегося в слабоионизированном воздухе, время удержания заряда достигает нескольких часов, поэтому при перемещении заготовки на II позицию силы обжатия сохраняются. При испарении материала эти силы препятствуют его расслоению, что позволяет получать изделия повышенного качества. Попутно в таком устройстве решена задача установки и закрепления заготовки во время ее обработки, поэтому подложка должна иметь высокое качество поверхности и хорошо отражать излучение. Применение прокладки *9* из диэлектрического материала, который не разрушается пучком излучения (фторопласт при нагревании просветляется до прозрачного состояния), предотвращает стекание разряда с поверхности у кромки изделия и исчезновение сжимающей силы. При по-

вышенной шероховатости поверхности между нижней поверхностью заготовки и поверхностью подложки образуется зазор, равный R_z, который пробивается ввиду малости диэлектрической проницаемости воздуха по сравнению с диэлектриком и с переносом заряда «-» на нижнюю сторону заготовки. При этом сила сжатия слоев увеличивается, так как уменьшается на величину зазора расстояние между противоположными зарядами, однако снимается сила прижима заготовки к подложке, что недопустимо.

Практическая реализация этого метода обработки была осуществлена при лазерном раскрое слюды ($E_{пр} = 2 \cdot 10^8$ В/м; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\varepsilon = 7$) толщиной 50 мкм излучением CO_2-лазера ЛГИ-50-3 (λ = 10,6 мкм, P = 15 Вт). Расчетное значение силы обжима для приведенных выше величин F_i = 240 Н/см^2 ≈ 24 кГ/см^2. При таких усилиях прижима удалось получить качественные резы (без расслоения кромок) за один проход со скоростью раскроя V = 2 м/мин (рис. 11). Разработанная технология является единственным промышленным способом резки слюды.

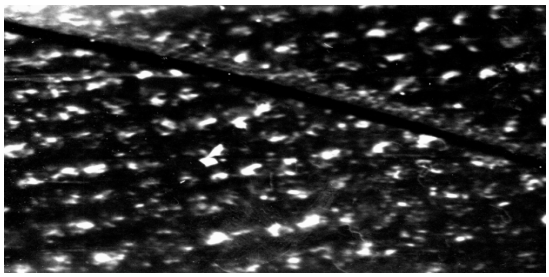

Рис. 11. Рез в заготовке из слюды (δ = 0,05 мм) после лазерной обработки в обжатом состоянии.

Обсуждение и заключение

При размерной обработке слоистых материалов (сверление, вырезание окон, контуров) натурального и искусственного происхождения возникают определенные трудности получения качественных результатов из-за анизотропности их структуры и свойств как в пределах каждого слоя, так и в пределах толщины заготовки. К недостаткам лазерной обработки можно отнести оплавление стенок реза, формирование дросса и грата, расслоение материала. Гибкость лазерного луча как инструмента позволяет добиться некоторого улучшения результатов технологической операции за счет оптимизации режима обработки, основанной на оперативном его изменении в соответствии со свойствами компонентов слоистого или композиционного материала. Однако кардинальное улучшение результатов обработки достигается за счет оптимизации технологической схемы операции, что подразумевает не только выбор порядка, количества и содержания ее переходов, но и обоснованного, и рационального подбора излучателя по длине волны излучателя и режима его работы. Принципиальным при этом является соответствие длины волны выбранному механизму разрушения каждого компонента материала, например послойному или взрывообразному его испарению. При первом варианте разрушения и удаления материала создается возможность приспособления режима обработки каждого слоя к его свойствам, однако инертность реакции излучателя на управление режимом генерации, а также необходимость поддержания неизменными пространственные характеристики пучка излучения могут быть преодолены воздействием на режим облучения, например скоростью относительного перемещения инструмента и заготовки. Определенным резервом повышения качества технологической операции являются приемы и средства не режимного воздействия на процесс обработки, в том числе привлечение дополнительных видов энергии, препятствующих проявлению тех или иных деструктивных факторов.

На основании полученных результатов, умозаключительных и экспериментальных, можно сделать следующие выводы.

1. Слоистые материалы, включая композиционные структуры, могут успешно обрабатываться (разрезаться, фрезероваться и сверлиться) пучком лазерного излучения путем испарения, плавления или хрупкого разрушения благодаря природной гибкости инструмента и оптимальной организации технологических операций.

2. Экспериментальные исследования показали, что достаточное качество обработки достигается при определенных принципах организации операций, главными из которых являются:

- послойное разрушение материала на режимах, соответствующих свойствам каждого слоя;
- исключение объемного механизма разрушения подбором соответствующего типа инструмента (длины волны излучения) или воздействием на поглощающие свойства поверхности заготовки (и ее слоев);
- управление режимом обработки в каждом переходе технологической операции рекомендуется выполнять без воздействия на режим генерации лазера, чтобы сохранить неизменными размеры пучка излучения в зоне обработки и обеспечить оперативность изменения режима обработки.

3. Эффективные средства достижения требуемого качества лазерной обработки слоистых материалов основаны либо на исключении источника их нежелательной деструкции (обычно вдоль плоскостей спайности слоев), например заменой режима испарительного вида разруше-

ния на режим плавления, либо на применении средств, препятствующих вредному воздействию продуктов испарения на обрабатываемое изделие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котляров В.П., Бобылев А.Г., Анякин Н.И., Иващенко А.Н. О возможности лазерной резки слюды. *Сб.: Лазерная технология.* Вильнюс: Институт физики АН Лат.ССР. 1988, (5), 65–70.
2. *http://plastics.ua/viscom/products/plast/akp/*
3. *Welding, cutting and drilling with light. LASAG industrial-lasers*. Thun Switzerland, 2007.
4. Введенов А.А., Гладуш Г.Г. *Физические принципы при лазерной обработке материалов*. М: Энергоиздат, 1985. 208 с.
5. Котляров В.П. *Технологія лазерної обробки (операції розмірної обробки).* Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2010. С. 53.
6. Анякін М.І. *Основи розробки технологічних засобів підвищення ефективності лазерної обробки.* Автореф. дис. докт. техн. наук. Київ, 2010.
7. SU 1125872 B23K 26/00 1983.02.13, Котляров В.П., Анякин Н.И. Способ лазерной пробивки отверстий.
8. Петров М. Лазерная обработка материалов в электронике. *Сб.: Компоненты и технологии.* 2000, (10), 35–42.
9. UA 67157 B23K 2012.02.10, Котляров В.П., Гніліцький Я. *Метод лазерної обробки шаруватих діелектриків.*

Поступила 11.03.12

Summary

The article deals with the problems on quality of laser machinig of workpieces from the laminates of natural and artificial origin (micas, thermoplastics and thermosetting plastics, foiled sheets and composite). The basic disadvantages of laser machining operations (contour excision and sewing of openings) are material delamination at the edges of treated workpieces, melting and destruction of the latter. Reasons for their occurrence are nonoptimal conditions of irradiation and modes of machining, the selected mechanism of destruction of the workpiece material in the applied technological schemes of operations. Theoretical and experimental studies of the machining process of various laminates allowed us to formulate and realize high-quality machining principles. The modes and results of machining of work pieces from mica, foiled sheets and composites are described.