ЛАЗЕРНЫЙ РАСКРОЙ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 1999 Д.М. Гуреев, С.И. Кузнецов, А.Л. Петров

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Изучены возможности лазерного излучения для реализации раскроя листовых углеродных материалов. Теоретически обосновано и экспериментально показано, что непрерывное лазерное излучение эффективно лишь для раскроя углепластиков и углерод-углеродных композиционных материалов толщиной до 1.5 мм. Для лазерного раскроя углекомпозитов большей толщины перспективным является использование импульсно-периодического излучения с большой частотой следования импульсов в режиме многопроходной резки.

Введение

Углеродные материалы такие, как углепластики и углерод-углеродные композиты по своим уникальным характеристикам относятся к одним из наиболее перспективных материалов для авиакосмической промышленности, автомобилестроения, нефтехимии. При изготовлении из них изделий различного функционального назначения ответственными технологическими операциями являются формообразование и раскрой. Вместе с тем традиционные методы механического раскроя, формирования отверстий, пазов, применяемые при обработке углеродных композиционных материалов, весьма трудоемки и не лишены недостатков, к числу которых следует отнести: сильный износ режущего инструмента и необходимость использования алмазных и твердосплавных вставок; возникновение трещин, расслоение материала и махрение кромок из-за вибрационных и ударных нагрузок со стороны режущего инструмента на обрабатываемый материал; ограничения, накладываемые контуром раскроя; большой процент отходов; вредные условия труда.

Одним из возможных путей преодоления трудностей механообработки и перевода технологии раскроя на более высокий качественный уровень является использование мощных технологических лазеров. В настоящее время в литературе практически отсутствуют сведения о применении лазерного излучения для обработки углеродных композиционных материалов, в том числе и для их раскроя. В соответствии с этим целью данной работы являлось определение основных характеристик лазерного раскроя углепластиков и углерод-углеродных композитов для выявления возможностей практического использования лазеров непрерывного и импульсно-периодического действия при изготовлении изделий из углеродных композиционных материалов.

Физические предпосылки лазерного раскроя углеродных композиционных материалов

Основными характеристиками лазерного раскроя являются ширина и глубина реза, качество формируемых кромок, ширина зоны термического влияния (ЗТВ). В общем случае на процесс лазерного раскроя влияют три группы факторов: теплофизические и оптические свойства материала; пространственно-временные и энергетические характеристики лазерного излучения; технологические условия реализации процесса.

В большинстве случаев при лазерном раскрое локальный нагрев осуществляется за времена более 10⁻⁸ с, что позволяет использовать для описания тепловых процессов классическую теорию теплопроводности. В зависимости от параметров теплового источника (мощности или энергии излучения, диаметра пятна фокусировки, длительности воздействия) используют различные модели нагрева. Для оценки параметров раскроя и выявления их функциональной взаимосвязи можно воспользоваться простой моделью полного теплового баланса [1].

Если принять, что вся энергия излучения расходуется на плавление и испарение материала, то можно записать

$$AP = vbh\rho(c\Delta T + L_m + mL_{ev}), \qquad (1)$$

где P – падающая на поверхность мощность излучения, A – поглощательная способность поверхности, v – скорость перемещения лазерного луча, b – ширина реза, h – глубина прорезания, ρ - плотность материала, c – теплоемкость, L_m – скрытая теплота плавления, L_{ev} – скрытая теплота испарения, m – доля испаренного вещества.

Из выражения (1) в приближении быст-

родвижущегося теплового источника ($\frac{vr}{a} >> 1$, где d = 2r – диаметр пятна фокусировки, a – коэффициент температуропроводности) легко рассчитать зависимость h(P). В предположении, что вся энергия лазерного излучения затрачивается на нагрев удаляемого материала до температуры испарения и передачу ему скрытой теплоты испарения, максимальную глубину слоя испаряемого материала можно определить как

$$h = \frac{2AP}{\pi r_f \rho v (cT_{ev} + L_{ev})},$$
(2)

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

где радиус r_{f} определяется коэффициентом сосредоточенности поверхностного теплового источника. Линейная зависимость h(P) справедлива при небольших толщинах разрезаемого материала, равных нескольким r_{f} . При больших толщинах материала

$$h \sim \sqrt{P}$$
.

Ширину ЗТВ можно оценить из простого соотношения для температуры нагрева, обусловленного действием нормально-полосового источника, интенсивность которого в радиальном направлении распределена по закону Гаусса, а по толщине пластины равномерно [2]. В этом случае

$$T(y) = \frac{AP}{vhc\rho r_f \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{r_f^2}\right).$$
 (3)

При резке в импульсно-периодическом режиме, когда лазер генерирует импульсы длительностью $\tau \tau$ с частотой следования f, при длительности импульсов $\tau < 0.1 \frac{r}{v}$ импульсный источник тепла можно считать неподвижным. Так как для углепластиков и углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) величина $\sqrt{a\tau} \sim 10^{-2}$ мм, а $r_f > 10^{-1}$ мм, то для оценок результатов воздействия лазерного излучения на эти материалы вполне справедливо использовать одномерную модель распространения тепла. После окончания очередного импульса материал начинает остывать и при

частоте следования импульсов $f < \frac{a}{30r_f^2}$ по-

степенного накопления теплоты не происходит. В этом случае параметры реза определяются только энергетическими и временными параметрами импульса. Зависимость глубины реза от энергетических и временных параметров импульса подробно рассмотрены в работах [1, 3-5].

На профиль реза, его глубину и ширину существенное влияние оказывают размер пятна фокусировки, фокусное расстояние оптической фокусирующей системы, смещение фокальной плоскости относительно поверхности обрабатываемого материала, степень поляризации излучения, характер распределения интенсивности по сечению пучка. Влияние этих параметров на характер реза достаточно хорошо изучено. Здесь же следует отметить, что для углеродных материалов отражение излучения стенками и волноводный характер распространения луча внутри канала реза не имеет столь существенного значения, как для металлов, изза относительно невысокой отражательной способности углерода.

На первый взгляд, лазерный раскрой углепластиков и УУКМ представляется достаточно простым процессом. Однако имеются особенности, отличающие его от процессов лазерного раскроя других материалов. К числу таких особенностей, в первую очередь, относится высокая температура в зоне реза, равная температуре испарения углерода. При таких температурах возможно образование пироуглеродных структур, существенно отличающихся от структуры исходного материала. Под действием высоких температур может образоваться широкая ЗТВ с различными параметрами кристаллической решетки по ее ширине. Сочетание неоднородной кристаллической структуры с наличием пор, заполненных газом при высо-

ком давлении, вызывает рост внутренних напряжений. В результате в ЗТВ образуется система микротрещин, которая может перейти на макроуровень и вызвать расслоение материала по границе наполнителя с матрицей. В углепластиках этот процесс осложняется деструкцией полимерной матрицы. Отвержденные фенолформальдегидные и эпоксидные смолы, являющиеся связующими в углепластиках, длительное время стабильны лишь до температур 150...200 °С. При температурах выше 300 °С начинается разложение полимера с выделением газообразных продуктов пиролиза с последующим переходом к горению, если нагрев происходит в воздушной среде [6-8]. В работе [9] приведены результаты по резке эпоксидных пластиков с наполнителем из кевлара, стеклянных и углеродных волокон непрерывным СО₂лазером и твердотельным импульсно-периодическим лазером. Отмечено, что применение непрерывных твердотельных и СО₂-лазеров для резки углепластиков нецелесообразно вследствие сильной деструкции связующего и образования ЗТВ, достигающей 8 мм. При резке импульсно-периодическим лазером ширина ЗТВ уменьшается и зависит от длительности импульса.

Приведенные результаты не позволяют сделать однозначного вывода о целесообразности использования лазеров для раскроя углеродных композиционных материалов.

Методика и техника эксперимента

Для лазерного раскроя углеродных композиционных материалов использовались технологические лазерные комплексы преимущественно на базе CO₂-лазеров Катунь и ЛГИТ-М, включавшие в себя собственно тот или иной лазер, оптическую систему для формирования лазерного пучка, координатный стол для перемещения разрезаемого материала, систему управления работой лазера и координатного стола, а также тракт для подачи газа в зону воздействия лазерного излучения.

Газоразрядный CO_2 -лазер Катунь с расходимостью излучения $\leq 2 \times 10^{-3}$ рад. предназначен для резки, сварки и термообработки материалов. Мощность его излучения в наших экспериментах составляла 500 Вт.

Импульсно-периодический лазер ЛГИТ-М

так же, как и лазер Катунь предназначен для выполнения технологических операций резки, сварки и термообработки материалов. Максимальная средняя мощность его излучения составляет 1 кВт с диапазоном регулирования от 150 Вт до 1 кВт. Длительность импульса по основанию может изменяться от 5 до 50 мкс за счет снижения доли CO_2 в рабочей смеси. Частота следования импульсов варьируется от 250 до 500 Гц. Расходимость излучения у лазера ЛГИТ-М гораздо больше, чем у лазера Катунь и равна ~ 1×10^{-2} рад.

Лазерное излучение фокусировалось на поверхность образца двухлинзовым объективом из KCl с фокусным расстоянием 200 мм. Использование такого объектива позволяло минимизировать поперечную сферическую аберрацию и уменьшить диаметр перетяжки сфокусированного пучка. Наименьший диаметр пятна фокусировки находился на поверхности разрезаемого образца, что обеспечивало минимальную ширину реза.

Соосно с излучением в зону реза через сопло диаметром 1.5 мм подавался азот, аргон или углекислый газ. Конструктивное исполнение газового резака показано на рис. 1. Влияние газодинамических параметров при резке



Рис. 1. Конструкция газового резака

углеродных материалов не является столь определяющим фактором, как при резке металлов, так как в нашем случае резка осуществляется в режиме испарения материала. Тем не менее, использование потока вспомогательного газа повышает качество реза и уменьшает ширину ЗТВ. Ранее установлено, что оптимальный диапазон давлений рабочего газа для неметаллов равен 1.5...2.5 кгс/см² [5]. Исходя из этого, давление газа во всех наших экспериментах не изменялось и составляло 2 кгс/см².

Разрезаемый образец закреплялся на трехкоординатном столе портального типа К-701. Стол позволяет обрабатывать детали размером 2000 × 2000 мм. Подвижной частью в нем является газооптический резак. Управление движением резака осуществляется с помощью фотосчитывателя с шаблона по контрасту. Система управления позволяет осуществлять раскрой листового материала со скоростями от 0.1 до 3 м/мин.

Анализ зоны реза углеродных композитов осуществлялся с помощью оптического металлографического микроскопа Neophot-30. Регистрировались ширина реза, ширина ЗТВ на поверхности образца и на поперечном срезе, приращение толщины кромок реза, наличие пор и трещин в ЗТВ на поверхности реза и на поперечном срезе.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Раскрой непрерывным лазерным излучением. Основным механизмом лазерного раскроя углепластиков и УУКМ является механизм испарения. При этом в отличие от УУКМ воздействие мощного лазерного излучения на углепластики на стадии, предшествующей испарению, ведет к термодеструкции матрицы с образованием коксового остатка. Так как энергия активации процесса термодеструкции полимерной матрицы (70...100 кДж/моль) примерно на порядок меньше, чем скрытая теплота испарения углерода (713 кДж/моль) [10], то можно считать, что определяющее влияние на энергетические и кинетические параметры процесса разрушения оказывают физические и химические свойства углерода. В соответствии с этим влияние параметров лазерного воздействия на скорость резки, а также глубину и ширину реза должно быть примерно одинаковым



Рис. 2. Зависимость глубины реза h от скорости резки v углекомпозитов толщиной 1.5...3.0 мм

как для углепластиков, так и для УУКМ. В частности, из выражения (2) следует, что с увеличением скорости резки неметаллических материалов при фиксированной мощности излучения глубина реза уменьшается. Экспериментально подтверждено, что данная зависимость практически одна и та же для углепластиков и УУКМ (рис. 2). Расчет по формуле (2) показал, что для использованной оптической системы при мощности излучения 500 Вт максимальная скорость резки образцов толщиной 3 мм должна быть равной ~ 0.3 м/мин. В наших экспериментах для образцов из углепластика толщиной 3 мм максимальная скорость резки составила 0.27 м/мин, для образцов из УУКМ такой же толщины - 0.31 м/мин. Максимальная скорость резки материала толщиной 1.5 мм равнялась 0.6 м/мин. Дальнейшее увеличение скорости резки возможно за счет увеличения мощности лазерного излучения и уменьшения диаметра фокального пятна.

Для сравнения можно привести результаты раскроя углепластика толщиной 3 мм излучением непрерывного CO₂-лазера ЛОКОН-3 мощностью ~ 2 кВт. Для фокусировки использовалась оптическая система с фокусным расстоянием 160 мм. В качестве рабочего газа служил сжатый воздух. При данных параметрах полное прорезание обеспечивалось при скорости перемещения образца 0.85 м/мин. При скорости 0.9 м/мин имело место частичное непрорезание.

Лазерному раскрою излучением непре-

Тип лазера	Толщина	Ширина	Ширина ЗТВ на	Ширина ЗТВ	Приращение
	образца,	реза, мм	поверхности, мм	на поперечном	толщины
	MM			срезе, мм	образца в
					зоне реза, мм
Катунь	1.5	0.40	1.80	2.01	0.1
Катунь	3.0	0.50	2.50	2.95	0.1
ЛОКОН-3	3.0	1.00	4.55	4.00	0.2
ЛТН-103	3.0	0.65	2.80	2.30	0.1

Таблица 1. Параметры резов углепластиков, выполненных непрерывным лазерным излучением с максимальными скоростями резки

рывного твердотельного YAG:Nd-лазера ЛТН-103 подвергался образец углепластика толщиной 3 мм. В проведенных экспериментах выходная мощность лазерного излучения составляла 200 Вт. Для фокусировки излучения использовался объектив с фокусным расстоянием 50 мм. Фокус располагался на поверхности образца. Расстояние от среза сопла до поверхности составляло 2 мм. В зону реза поддувался сжатый воздух при давлении 6 атм. При этом максимальная скорость перемещения образца, при которой происходило его полное прорезание, составила 0.065 м/мин.

Таким образом, определяемая из выражения (2) глубина резки хорошо согласуется с экспериментальными данными как для углепластиков, так и для УУКМ, и потому может быть использована для предварительного выбора технологических параметров процесса.

В зависимости от скорости резки меняется геометрия канала реза и ЗТВ. При увеличении скорости ширина реза со стороны воздействия излучения оставалась практически постоянной и составляла 0.4...0.5 мм. На нижней поверхности образца ширина реза изменялась от 0.4 до 0.1 мм при максимальной скорости резки. Угол скоса кромок при скорости резки, близкой к максимальной, не превышал 3° для образцов толщиной 3 мм и 5.5° для образцов толщиной 1.5 мм. Отличительной особенностью процесса резки углепластиков является наличие нижней границы скорости резки. Уменьшение скорости резки до 0.2 м/мин приводит к воспламенению материала и переходу термической деструкции матрицы в зоне лазерного воздействия в неуправляемую термоокислительную деструкцию.

В таблице 1 приведены результаты наиболее качественных резов углепластиков, выполненных с помощью непрерывных лазеров Катунь, ЛОКОН-3 и ЛТН-103.

Различия в ширине реза и ЗТВ для разных лазеров связаны с расходимостью их излучения, поддуваемым в зону реза рабочим газом, фокусирующей оптической системой.

Важнейшими показателями качества лазерной резки и возможности ее технологического применения является размер ЗТВ и характер структурных изменений в ней. Большая ширина ЗТВ и формирование дефектов при резке углепластиков непрерывным лазерным излучением связаны с наличием нескольких факторов, к числу которых, в первую очередь, относятся высокая температура испарения углеродных волокон и кокса, образующегося в результате термодеструкции матрицы, низкая температура термодеструкции самой полимерной матрицы и значительная степень термической анизотропии углепластика. Следствием последнего является преимущественное распространение тепла вдоль волокон с образованием ЗТВ. В результате такого теплоотвода на некотором расстоянии от кромки реза происходит полная термодеструкция матрицы. Далее формируется переходный слой, в котором эпоксидная матрица претерпевает частичную термодеструкцию.

Ширину ЗТВ y_d можно оценить, воспользовавшись соотношением (3)

$$y_d = r_f \sqrt{\ln \frac{AP}{T_d v h c \rho r_f \sqrt{\pi}}}.$$
 (4)

Выражения (3) и (4) справедливы для быстродвижущихся источников, т. е. источников, скорость движения которых удовлетворяет ус-

ловию $v >> \frac{a}{r_f}$. Оценки показывают, что та-

кому условию для излучения мощностью 500 Вт в проведенных экспериментах удовлетворяют скорости перемещения лазерного луча по поверхности материала более 2 м/мин. Для лазерной резки материалов толщиной 1.5 мм излучением мощностью 500 Вт со скоростью 3 м/мин при радиусе фокального пятна 0.25 мм расчеты по формуле (4) дают 3TB ~ 0.6 мм. В реальных экспериментах размер 3TB при таких условиях составляет 0.9 мм. Если учесть, что реальный радиус фокального пятна соответствует 0.4 мм, то наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов.

Для увеличения глубины реза необходимо пропорциональное увеличение мощности излучения. На практике эффективность процесса с возрастанием мощности излучения несколько ниже, приблизительно соответствуя зависимости $h \sim \sqrt{P}$.

Таким образом, ширина ЗТВ при резке углепластиков любой толщины непрерывным лазерным излучением не может быть существенно меньше одного миллиметра. При увеличении толщины разрезаемого материала ширина ЗТВ возрастает.

Иная ситуация возникает при лазерной резке УУКМ. Температура карбонизации и последующей термообработки УУКМ превышает температуру термодеструкции полимерной матрицы углепластиков в 5...10 раз. В этом случае, согласно выражению (4), ЗТВ в УУКМ при больших скоростях резки может быть в 1.5...2.0 раза меньше, чем в углепластиках. При малых скоростях резки карбонизованных УУКМ размеры ЗТВ в них такие же, как и в углепластиках. Образующаяся при резке УУКМ ЗТВ с более высокой степенью графитации может оказывать положительное влияние на эксплуатационные свойства изделий.

Характерный вид кромки реза приведен на рис. 3. Анализ зон реза в образцах из УУКМ и углепластиков показал, что на поверхности реза возникает плотный слой сублимированного углерода серебристо-серого цвета толщиной около 0.1 мм. Сублимированный углерод возникает при испарении углеродных волокон и кокса матрицы под действием лазерного излучения и последующем осаждении углерода на кромки реза. Регтгеноструктурный анализ показал, что пироуглерод имеет высокую степень графитации (около 70%) и проявляет признаки трехмерной упорядоченности, характерные для структуры графита. Кроме того, при резке углепластиков толщиной 1.5 мм на поверхностях реза зафиксированы микротрещины, располагающиеся в продольном направлении между прослойками волокон. Поры как на поперечном срезе, так и на поверхности реза отсутствуют. Резка углепластиков толщиной 3 мм сопровождается более интенсивным выгоранием матрицы, а также появлением на поверхности реза крупных пор глубиной до 7 мм (рис. 4). При резке углепластиков излучением использованных нами непрерывных лазеров появление трещин и выгорание матрицы приводит к увеличению толщины кромок реза (рис. 5), а при резке излучением лазера ЛОКОН-3 наблюдалось даже расслоение кромки реза вследствие образования больших продольных трещин.

При резке УУКМ непрерывным лазерным излучением количество образующихся дефектов значительно меньше, чем при резке углепластиков. В ЗТВ не наблюдается выгорание матрицы, а происходит лишь изменение кристаллической структуры углеродных волокон и коксового связующего. Количество пор на поверхности реза и их размеры зависят от плотности разрезаемого материала и уменьшаются с ее возрастанием. Увеличение толщины кромок реза незначительно и наблюдается только при малых скоростях резки (менее 0.3 м/мин). Так как выгорания матрицы при резке УУКМ нет, то отсутствует и расслоение кромок реза при любых скоростях резки.

Для удаления из зоны реза продуктов разрушения применяют подачу газа. Предотвращение воспламенения и уменьшение зоны обугливания в углепластиках, как следует из выше-



Рис. 3. Характерный вид кромки реза

сказанного, предопределяет использование таких наиболее дешевых газов, препятствующие окислению материала, как аргон, азот и углекислый газ. Для определения влияния различных газов на глубину реза и ширину ЗТВ были проведены эксперименты по лазерной резке углепластиков в контролируемой среде. Установлено, что отдельно глубина реза и ширина ЗТВ практически одинаковы в азотной и аргоновой средах. При малых скоростях резки углеграфитовых материалов углекислый газ может играть роль окислителя. При больших скоростях резки, когда ЗТВ существенно меньше, наиболее предпочтительно использовать СО,, так как этот газ приостанавливает распространение коксообразования в материале на значительную глубину вследствие присоединения активных в данных условиях молекул СО₂. Углерод с молекулярным азотом практически не взаимодействует, так как константа равновесия этой реакции чрезвычайно мала. Однако взаимодействие с атомарным азотом с образованием цианогена (С₂N₂) происходит достаточно легко, поэтому для резки УУКМ наиболее предпочтительным представляется использование аргона.

Раскрой импульсно-периодическим лазерным излучением. В экспериментах по резке углепластиков импульсно-периодическим излучением преимущественно использовался лазер ЛГИТ-М, у которого длительность импульса составляла 20 мкс, частота следования импульсов – 500 Гц, энергия в импульсе – 1 Дж. Временная форма импульса излучения этого лазера характеризуется крутым передним фронтом с мощным пиком и пологим задним фронтом. Такая форма импульса не является оптимальной для резки углепластиков. Воздействие переднего пика на разрезаемый материал приводит к образованию оптического разряда в его парах. Плазма оптического разряда вблизи поверхности вызывает рефракцию излучения, его поглощение и последующую передачу энергии в окружающую среду и обрабатываемый материал. В результате эти процессы приводят к снижению эффективности резки и увеличению 3TB.

Эксперименты по резке углепластиков импульсно-периодическим излучением показали, что, как и при резке непрерывным излучением, в этом случае сохраняется обратно про-



Рис. 4. Вид реза, характеризующегося наличием пор

порциональная зависимость глубины реза от скорости перемещения образца, причем максимальные скорости резки и в том, и другом случае оказываются практически одинаковыми. Так в импульсно-периодическом режиме максимальная скорость резки для образцов толщиной 3 мм составила 0.26 м/мин, а для образцов толщиной 1.5 мм – 0.54 м/мин. Ширина реза лазером ЛГИТ-М оказалась равной 1.0...1.1 мм, что почти в три раза превышает ширину реза лазером Катунь. Такое различие прежде всего связано с большей расходимостью излучения лазера ЛГИТ-М.

Геометрия канала реза и характер ее изменения при изменении скорости резки импульсно-периодическим излучением соответствуют аналогичным характеристикам при резке непрерывным излучением. Результаты наиболее качественных резов, полученных с помощью лазера ЛГИТ-М, приведены в таблице 2. Здесь же для сравнения приведены результаты резки углепластиков излучением лазеров Квант-15 и СО₂-ТЭИЛ-0.4.

Сравнение таблиц 1 и 2 показывает, что



Рис. 5. Вид реза, характеризующегося увеличением толщины кромки

ширина ЗТВ при резке углепластиков импульсно-периодическим излучением почти в два раза меньше, чем ширина ЗТВ при резке непрерывным излучением, хотя и составляет существенную величину. Все характерные дефекты в ЗТВ, образующиеся при резке непрерывным излучением, присущи и для резки лазером ЛГИТ-М. На поверхности резов появляется плотный слой сублимированного углерода с микротрещинами, которые располагаются преимущественно в продольном направлении. Для образцов толщиной 3 мм характерно наличие крупных пор как на поверхности реза, так и на поперечном срезе. При резке лазером ЛГИТ-М появление трещин, а также выгорание матрицы приводят к несколько большему увеличению толщины кромок реза, чем при резке лазером Катунь.

Как следует из таблиц 1 и 2, наиболее предпочтительной оказывается резка излучением лазеров Квант-15 и СО₂-ТЭИЛ-0.4 в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 10 Гц. Несмотря на то, что резка лазером Квант-15 сопровождается частичным выгоранием матрицы, образованием трещин и незначительных пор, формированием реза с ярко выраженным рельефом, размеры ЗТВ в этом случае в несколько раз меньше, чем при резке непрерывными лазерами и лазером ЛГИТ-М. Наиболее качественный рез получен на лазере СО₂-ТЭИЛ-0.4 с размером ЗТВ, не превышающим 0.1 мм, и отсутствием характерного рельефа поверхности реза, а также слоя пироуглерода на ней. Применение для резки углепластиков лазера СО₂-ТЭИЛ-0.4 позволяет практически избежать появления и всех остальных дефектов и, следовательно, сохранить исходную толщину образца в зоне реза. Ширина реза в данном случае определяется диаметром пятна фокусировки. Основным недостатком процесса раскроя углекомпозитов излучением лазеров Квант-15 и СО₂-ТЭИЛ-0.4 является очень низкая скорость резки, обусловленная низкой частотой следования импульсов. Так, для лазера Квант-15 максимальная скорость резки углепластика толщиной 0.3 мм составила 0.03 м/мин, а для лазера СО₂-ТЭИЛ-0.4 – 0,012 м/мин, т. е. на один - два порядка меньше, чем для непрерывных лазеров и лазера ЛГИТ-М. Увеличение скорости резки излучением импульсно-периодических лазеров возможно только при увеличении частоты следования импульсов.

Уменьшение расходимости излучения лазеров с высокой частотой следования импульсов и оптимизация длительности и временной формы импульса с целью устранения приповерхностной плазмы являются определяющими для уменьшения как ширины реза, так и размера ЗТВ. Другая возможность улучшения качества реза и уменьшения ЗТВ заложена в согласовании скорости перемещения луча относительно материала и частоты следования импульсов.

Рассмотрим воздействие импульса лазера ЛГИТ-М на поверхность углепластика. Длительность импульса и радиус фокального пятна полностью соответствуют критерию применимости одномерной модели распространения тепла в результате действия поверхностного теплового источника: в данном случае $\sqrt{a\tau} \approx (2...6) \times 10^{-3}$ мм, а $r_f \approx (4...5) \times 10^{-1}$ мм. Условие неподвижности импульсного источника выполняется во всем диапазоне использованных

излучением с максимальными скоростями резки							
Тип лазера	Толщина	Ширина	Ширина ЗТВ на	Ширина ЗТВ	Приращение		

Таблица 2. Параметры резов углепластиков, выполненных импульсно-периодическим лазерным

Тип лазера	Толщина	Ширина	Ширина ЗТВ на	Ширина ЗТВ	Приращение
	образца,	реза, мм	поверхности, мм	на	толщины
	ММ			поперечном	образца в
				срезе, мм	зоне реза,
					MM
ЛГИТ-М	1.5	1.05	1.0	1.07	0.2
ЛГИТ-М	3.0	1.05	1.3	1.80	0.2
Квант-15	3.0	0.70	0.5	0.65	0.2
СО2-ТЭИЛ-0.4	1.5	1.60	0.0	0.10	0.0
СО2-ТЭИЛ-0.4	3.0	1.60	0.0	0.05	0.0

скоростей. Для углепластиков предельная частота, при которой постепенного накопления теплоты не происходит, не превышает 2 Гц. Поскольку частота следования импульсов лазера ЛГИТ-М равна 500 Гц, то при резке со сквозным прорезанием сказывается эффект накопления тепла, в результате чего и происходит образование неприемлемо большой ЗТВ. Для того, чтобы исключить эффект накопления тепла, нужно подобрать такую скорость резки, чтобы в пятно лазерного воздействия попадало как можно меньше импульсов. При частоте 500 Гц максимально возможная скорость перемещения образца относительно лазерного луча должна составлять 30 м/мин. В этом случае в зону лазерного воздействия попадает один импульс. Глубина зоны испарения за один импульс составляет сотые доли миллиметра, поэтому для полного прорезания материала необходимо выполнить несколько проходов, их количество должно быть согласовано с толщиной разрезаемого материала. Проведенные эксперименты показали, что для прорезания углепластиков толщиной 1.5 мм необходимо сделать 15 проходов со скоростью 6.7 м/мин (5 импульсов в единичную зону воздействия), что соответствует резке подобного материала за один проход со скоростью 0.45 м/мин. При снижении скорости резки до 5 м/мин за те же 15 проходов удается осуществить прорезание на глубину 2.1 мм. На рис. 6 приведена зависимость минимального количества проходов для полного прорезания при многопроходной резке углепластиков от толщины материала. На рис. 7 показано поперечное сечение такого многопроходного реза. Максимальная ширина реза равна 0.95 мм, ширина ЗТВ не превышает 0.5 мм. В ЗТВ ближе к резу наблюдается выгорание матрицы, далее располагается относительно небольшая зона частичной термодеструкции связующего полимера. Характерным отличием от реза, выполненного излучением того же лазера с полным прорезанием за один проход, является малая толщина слоя пироуглерода на поверхности реза, который образуется только на углеродных волокнах. Полное прорезание углепластика толщиной 3 мм выполнено за 21 проход со средней скоростью резки 0.24 м/мин, сравнимой со скоростью резки этого материала на всю глубину за один проход. ЗТВ при такой много-



проходов N для полного прорезания углепластика от его толщины h

проходной резке почти в четыре раза меньше, чем при однопроходной резке, и в шесть раз меньше, чем при резке непрерывным СО₂-лазером Катунь при сопоставимых значениях мощности излучения и скорости резки. Следует отметить, что реализованные нами скорости многопроходной резки не являются оптимальными с точки зрения минимизации ЗТВ. Дальнейшее уменьшение ЗТВ при многопроходной резке возможно при использовании таких скоростей перемещения детали, при которых в зону лазерного воздействия будет попадать не более 4 импульсов (v > 8 м/мин). В описанных экспериментах в качестве вспомогательного газа использовался аргон, так как применение СО₂ приводило к увеличению плазменного факела и возрастанию ЗТВ. Оптимизация длительности и временной формы лазерного импульса с целью устранения приповерхностной плазмы, уменьшение диаметра фокального пятна, а также использование для поддува углекислого газа должны благоприятно отразиться на качестве резки.

Выводы

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что использование непрерывного лазерного излучения для резки углепласти-

ков и УУКМ при условии $v \leq \frac{a}{r_f}$ приводит к формированию ЗТВ, превышающей 1 мм. Рез-

ка непрерывным лазерным излучением углепластиков толщиной более 1.5 мм нецелесообразна. Лазерная же резка углепластиков толщиной менее 1.5 мм с 3TB, не превышающей 0.5 мм, возможна с высокими скоростями резки

 $\left(\frac{v >>}{r_f}\right)$ при условии высокого качества из-

лучения и фокусирующей оптической системы $(d_{e} < 0.3 \text{ мм}).$

Использование для резки углеродных композиционных материалов импульсно-периодического лазерного излучения позволяет существенно снизить или практически полностью исключить при малой частоте следования импульсов ЗТВ и существенно улучшить качество реза. Основным недостатком процесса резки импульсно-периодическим излучением при малой частоте следования импульсов является низкая скорость резки (0.01...0.03 м/мин). Перспективным вариантом является использование высокочастотного (более 100 Гц) лазерного излучения в сочетании с многопроходной резкой. В частности, согласование скорости резки с частотой следования импульсов позволило снизить ЗТВ в 4 раза по сравнению с однопроходной резкой импульсно-периодическим лазерным излучением и в 6 раз по сравнению с резкой непрерывным лазерным излучением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов.
 М.: Энергоатомиздат.1985.-208с.
- 2. *Рыкалин Н.Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз. 1951.-296 с.
- 3. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой



Рис. 7. Вид реза, полученного многопроходной резкой углепластика толщиной 3 мм

мощности на металлы. - М.: Наука. 1970. - 272 с.

- Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение. 1975. 296 с.
- Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. - М.: Машиностроение. 1985. - 496 с.
- Лосев И.П., Тростянская Е.Б. Химия синтетических полимеров. - М.: Химия. 1964. -640 с.
- Фрейзер А.Г. Высокотермостойкие полимеры. М.: Химия. 1971. 294 с.
- Энциклопедия полимеров в 3-х томах // Под ред. В.А. Каргина, В.А. Кабанова. - М.: Советская Энциклопедия. 1972 - 1977.
- Абильсиитов Г.А., Голубев В.С., Гонтарь В.Г., Горохов Ю.А., Колпаков А.А., Майоров В.С., Новицкий Л.А., Рукман Г.И., Сафонов А.Н., Сумерин В.В., Якунин В.П. Технологические лазеры. Справочник в 2-х томах. Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация. - М.: Машиностроение. 1991. - 432 с.
- 10. Шулепов С.В. Физика углеграфитовых материалов.- М.:Металлургия. 1972.-305 с.

LASER CUTTING OF CARBONIC COMPOSITE MATERIALS

© 1999 D.M. Gureev, S.I. Kuznetsov, A.L. Petrov

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The abilities of laser radiation to realize the cutting of sheet carbonic materials are researched in this paper. It is theoretically stated and experimentally proved that continuous laser radiation is effective only for cutting of coal-plastics, carbons and carbonic composite materials of 1,5 mm thick. The usage of impulse-periodic radiation with higher frequency of impulses in the multi-pass cutting mode is proposed for laser cutting of more thick carbonic composites.

УДК 621.373.926:621.79

ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ И ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РАСКРОЙ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

© 1999 Д.М. Гуреев, А.Л. Петров

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Изучены особенности лазерно-дугового и лазерно-ультразвукового раскроя листового металла. Показаны преимущества использования комбинированных высококонцентрированных источников энергии для формирования качественных зон резов.

В настоящее время в различных отраслях промышленности широкое применение находят листовые жаропрочные сплавы на никелевой основе. Поскольку данные материалы обладают повышенной вязкостью, их раскрой механическими способами весьма затруднителен. В связи с этим резка жаропрочных сплавов с помощью сфокусированного лазерного излучения может оказаться эффективней традиционных способов раскроя (резка на виброножницах, плазменнодуговая резка и т. п.). Основные преимущества лазерной резки сводятся к возможности получения узкого реза шириной в несколько десятых долей миллиметра, небольшой величине зоны термического влияния, возможности раскроя по сложному контуру. Максимальная толщина разрезаемого материала и производительность процесса лимитируются мощностью лазера. В соответствии с этим перспективность лазерных технологий, базирующихся на использовании относительно маломощных лазерных источников, во многом будет определяться разработкой комплексных подходов к их реализации, и в частности, использованием комбинированных источников энергии, таких как лазерно-дуговой и лазерно-ультразвуковой. Сочетание лазерного воздействия с воздействием плазмы электродугового разряда, с одной стороны, и ультразвуковых колебаний, - с другой, позволяет существенно расширить возможности лазерных источников в решении целого ряда практических задач, к числу которых относится раскрой листового металла.

В данной работе плазменно-дуговой источник использован в качестве дополнительного теплового источника, обеспечивающего подогрев зоны лазерного воздействия при реализации процесса резки. Ввод ультразвуковых колебаний в зону лазерного реза осуществлялся для возбуждения локальных вибраций материала. И в том, и в другом случае комбинированные источники энергии обеспечивали повышение производительности и улучшение качества раскроя листового металла.

Лазерно-дуговой раскрой. Известно, что с помощью дополнительных источников тепла можно добиться повышения эффективности использования непрерывного лазерного излучения [1, 2]. С точки зрения решения задачи лазерного раскроя это связано с увеличением поглощающей способности металла при нагревании, поскольку температурная зависимость поглощательной способности определяется соотношением

$$A(T) = a + bT , \qquad (1)$$

из которого следует, что, если металл предварительно подогреть, то его поглощательная способность возрастет. При этом большая доля лазерного излучения пойдет на плавление металла. В качестве источника дополнительной тепловой энергии может быть использована плазменно-дуговая горелка с неплавящимся электродом.

Эксперименты по резке листового металла проводились на базе технологического CO_2 -лазера ЛГН-702 с мощностью излучения 600 Вт. Схема реализации процесса показана на *рис.* 1. Лазерное излучение направлялось в резак 1, в котором расположены двухлинзовый объектив 2 с фокусным расстоянием f= 200 мм, защитная пластинка 3 для предотвращения попадания брызг расплавленного металла на объектив, сопло 4 для подачи ак-



Рис. 1. Схема лазерно-дуговой резки листового металла 1 – резак, 2 – фокусирующий объектив, 3 – защитная пластина, 4 – сопло для подачи активного газа, 5 – разрезаемый лист, 6 – дуговая горелка, 7 – координатный стол

тивного газа (воздуха или кислорода) в зону лазерного воздействия. Резак *1* свободно перемещается в тубусе. Разрезаемый лист *5* размещался на координатном столе 7. Плазменно-дуговая горелка *6* располагалась с противоположной по отношению к лазерному резаку поверхности листа.

Проведенные эксперименты по раскрою листовых жаропрочных никелевых сплавов толщиной 0.8...1.5 мм только лазерным излучением установки ЛГН-702 позволили выявить следующее:

- Ширина реза определяется в основном диаметром фокального пятна $d = \theta f$ на поверхности разрезаемого металла (здесь $\theta = 2 \times 10^{-3}$ рад — расходимость лазерного пучка, f



Рис. 2. Зависимость ширины зоны термического влияния (ЗТВ) от скорости резки

 – фокусное расстояние объектива) и при изменении скорости перемещения луча остается практически постоянной и равной ~ 0.4 мм.

- Ширина зоны термического влияния (3ТВ) с увеличением скорости перемещения луча уменьшается (*puc. 2*).

 Подача кислорода в зону лазерного воздействия вместо сжатого воздуха позволяет за счет дополнительного энерговыделения при реакции окисления увеличить скорость резания в 1.5 раза. Грат в этом случае образуется в основном окислами и легко удаляется с кромок.

Полученные результаты сведены в таблицу 1.

Скорость резания жаропрочного сплава ХН45ВМТЮ толщиной 2.2 мм с помощью лазерного излучения мощностью 600 Вт не превышала 640 мм/мин. При этом ширина реза составляла 0.5 мм, величина ЗТВ вблизи каждого края кромки – 0.7 мм. При больших скоростях перемещения луча наблюда-

Материал	Толщина Скорость резания,		Поддуваемый	Ширина реза,	Ширина ЗТВ,
	листа, мм	мм/мин	газ	MM	MM
ХН68ВМТЮ	0.8	1000	Воздух	0.4	0.25
ХН50ВМТЮ	1.2	320	Воздух	0.4	0.50
ХН50ВМТЮ	1.2	400	Воздух	0.4	0.40
ХН50ВМТЮ	1.2	500	Воздух	0.4	0.35
ХН50ВМТЮ	1.2	620	Воздух	0.4	0.30
ХН50ВМТЮ	1.2	800	Воздух	0.4	0.30
ХН50ВМТЮ	1.2	1000	Кислород	0.4	
ХН50ВМТЮ	1.2	1400	Кислород	0.4	
ХН75МВТЮ	1.2	320	Воздух	0.4	0.45
ХН75МВТЮ	1.2	800	Воздух	0.4	
ХН75МВТЮ	1.5	320	Воздух	0.4	0.45
ХН75МВТЮ	1.5	400	Воздух	0.4	0.35

Таблица 1. Результаты экспериментов по раскрою листовых жаропрочных никелевых сплавов

δ , мм	Δx (мм) при v (мм/мин)						
	400	500	600	700	1000		
2.2				3	6		
3.0		3	4	6			
4.0	6	7	8				

Таблица 2. Величины смещения

лось непрорезание листов. На этом материале отрабатывались режимы лазерно-дуговой резки. Ось электрода смещалась вперед по ходу движения теплового источника относительно оси лазерного луча на величину Δx (*puc. 1*). Величина Δx выбиралась такой, чтобы температура в проекции точки теплового воздействия плазменно-дугового источника на противоположную поверхность листа была максимальной. Максимальная температура достигается в момент времени, когда скорость ее изменения становится равной нулю. Оценку величины смещения Δx можно провести, используя модель поверхностного теплового источника, движущегося со скоростью *v* по пластине толщиной δ. В *табл.* 2 приведены величины смещения для ряда значений скоростей и толщины листов материала ХН45ВМТЮ.

Эксперименты по лазерно-дуговому раскрою показали следующее. При увеличении тока дуги от 20 до 70 А скорость резания увеличивается с 1000 до 1400 мм/мин (*puc. 3*). При этом ширина ЗТВ возрастает слабо. При больших значениях тока скорость резания



Рис. 3. Зависимость максимальной скорости резки от величины тока в дуговом разряде для жаропрочного сплава XH45BMTЮ толщиной d = 2.2 мм

практически остается постоянной, ширина же ЗТВ продолжает возрастать. В *табл. 3* приведены режимы, оптимальные по производительности и качеству резания. В качестве активных газов, подаваемых в зону лазерного воздействия, использовались сжатый воздух и кислород.

Обращает на себя внимание меньшая величина Δx по сравнению с расчетной (*табл. 2*) при использовании для поддува кислорода. Это можно объяснить тем, что в точке, отстоящей от оси плазменно-дугового воздействия на величину Δx , на противоположной стороне листа температура оказывается достаточной для образования окислов и повышения коэффициента поглощения лазерного излучения.

Таким образом, при использовании плазменно-дугового источника для подогрева зоны лазерного воздействия скорость резания может быть увеличена в 1.5...2.0 раза.

Лазерно-ультразвуковой раскрой. Для оценки влияния ультразвуковых вибраций на отрыв капель расплава от края реза воспользуемся соотношением [3]

$$F_{\sigma} = F_{w} + F_{u}, \qquad (2)$$

не учитывающим воздействие газового потока. Поддув инертного газа сводится к оттеснению расплава из зоны реза к его краям с обратной стороны листа, и потому не решает кардинальным образом вопрос об избавлении от гратообразования. В соотношении (2) $F\sigma_{\sigma}$ – сила сцепления капли расплава с твердофазной основой металла, F_w – вес капли, F_u – сила, воздействующая на каплю вследствие ультразвуковых вибраций. Будем исходить из того, что капля формируется путем расплавления металла объемом $\pi d^2 \delta/4$, где δ – толщина листа.

Для F_{σ} можно записать

$$F_{\sigma} = \pi d\sigma, \qquad (3)$$

где температурная зависимость коэффи-

Таблица 3. Оптимальные режимы резания

Газ	<i>I</i> , A	<i>v</i> , мм/мин	Δx , мм	Ширина реза, мм	Ширина ЗТВ, мм
Воздух	60	1000	6	0.5	1.0
Кислород	70	14000	4	0.5	1.0

циента поверхностного натяжения $\sigma\sigma$ определяется выражением

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} = -B \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{2/3},\tag{4}$$

B = 2.1 г см²/(с² град), ρ – плотность, μ – молекулярная масса.

Вес капли F_w равен

$$F_{w} = \frac{\pi d^2 \delta \rho g}{4} \,, \tag{5}$$

где *g* – ускорение свободного падения.

Воздействие ультразвуковых вибраций F_{μ} можно оценить как

$$F_{u} = \frac{\pi d^{2} \delta \rho \xi \omega^{2}}{4}, \qquad (6)$$

где ξ – амплитуда ультразвуковых колебаний, ω – частота.

Используя выражения (3), (5) и (6), из соотношения (2) получим условие на минимальную амплитуду ультразвуковых колебаний, при превышении которой ультразвуковые вибрации будут отрывать каплю расплава от края реза

$$\xi = \frac{4\sigma - d\delta\rho g}{d\delta\rho\omega^2} \,. \tag{7}$$

Анализ выражения (7) показывает, что ξ требуется тем меньше, чем выше будут частота колебаний ω и температура расплава *T*. Последняя влияет опосредованно через σ

$$\sigma = \sigma_m - B \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{2/3} \left(T - T_m\right), \qquad (8)$$

где σ_m – коэффициент поверхностного натяжения при температуре плавления T_m .

В привязке к нашим, достаточно общим, экспериментальным условиям оценка ξ из выражения (7) дает значения $\xi \approx 5...10$ мкм. Таким образом, для эффективного влияния ультразвуковых вибраций на отрыв капель лазерного расплава при раскрое листового металла толщиной 1...2.5 мм амплитуда ультразвуковых колебаний при частоте 22 кГц должна превышать 10 мкм, что в полной мере реализуется на практике.

Лазерно-ультразвуковой раскрой осуществлялся на базе твердотельного YAG:Nd-лазера ЛTH-103 с мощностью излучения, не превышающей 220 Вт. Для фокусировки лазерного излучения в пятно диаметром ~ 0.1 мм использовалась оптическая система COK-1. Скорость перемещения лазерного луча составляла единицы мм/с.

Ультразвуковые колебания вводились в зону лазерного реза с помощью конусообразного концентратора полуволновой длины, который крепился к торцу магнитострикционного преобразователя ПМС1-1, подключенного к выходу ультразвукового генератора УЗГ1-1. Концентратор поджимался к повер-



Рис. 4. Зоны лазерного (а) и лазерно-ультразвукового (b) реза в листовом металле толщиной 2.5 мм

хности разрезаемого листа вблизи пятна фокусировки лазерного излучения с усилием 50 Н. Частота ультразвуковых колебаний составляла 22 кГц, амплитуда – до 45 мкм, мощность – до 1 кВт.

Сопоставительные эксперименты по лазерному и лазерно-ультразвуковому раскрою листового металла показали хорошее согласие с теоретическими оценками влияния ультразвуковых колебаний на качество реза и возможность осуществления раскроя без гратообразования. Как видно из рис. 4, влияние ультразвука весьма существенно отражается на качестве реза, оно тем заметнее, чем толще листовой металл. Последнее объясняется возрастанием коэффициента поверхностного натяжения расплава вследствие уменьшения его температуры на противоположной стороне листа при заданной плотности мощности лазерного излучения на поверхности. С ростом толщины листа гратообразование при лазерном раскрое возрастает. Ввод ультразвуковых колебаний интенсифицирует процессы тепломассопереноса в лазерном расплаве и тем самым повышает его температуру и уменьшает коэффициент поверхностного натяжения на противоположной стороне листа. Последнее облегчает отрыв капель расплава от края реза потоком поддуваемого газа. Дополнительный эффект привносят ультразвуковые вибрации, сами по себе в отсутствие газового потока способствующие отрыву капель расплава от края реза.

Отработанный процесс реализован при вырезке деталей из листовой стали толщиной 2 мм. В результате использования комбинированного лазерно-ультразвукового источника достигнут высококачественный раскрой листового металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зайкин А.Е., Левин А.В., Петров А.Л., Странин С.А. Тепловые характеристики лазерно-дугового воздействия на металлы // Труды ФИАН. 1993. Т. 217. С. 98-111.
- Гуреев Д.М. Заплавление поверхностных трещин лазерно-дуговым источником // Физика и Химия Обработки Материалов. 1994. № 6. С. 139-144.
- Gureev D.M. Prospects for laser-ultrasonic treatment for surface modification, welding, and pattern cutting // Journal of Russian Laser Research. 1999. V. 20. № 1. P. 27-65.

ARC AND ULTRASONIC LASER CUTTING OF SHEET METAL

© 1999 D.M. Gureev, A.L. Petrov

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The peculiarities of arc and ultrasonic laser cutting of sheet metal are researched in this paper. The advantages of combined concentrated energy sources usage for forming of quality cut areas are demonstrated.

УДК 621.375.826

ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.И. Мордасов¹, Н.А. Сазонникова¹, В.П. Шорин²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет ²Самарский научный центр РАН

Рассмотрен способ и испытательное оборудование для обнаружения поверхностных дефектов в виде царапин, трещин, изменения состояния поверхности детали в результате химического воздействия и абразивного износа с использованием лазерных систем. Построена математическая модель вероятности распознавания дефектов по достижению энергетического соответствия зондирующего сигнала геометрическим параметрам исследуемого участка поверхности. Проведена экспериментальная оценка влияния глубины, угла раскрытия и расположения плоскости симметрии трещины на изменение распределения интенсивности излучения в световом пятне при его поверхностном отражении. Показаны преимущества применения в малогабаритных контрольно-измерительных системах лазерных диодов с квантоворазмерными структурами на основе материалов четверных систем.

Ограниченные возможности традиционных механических и оптических методов оценки поверхностных повреждений (невозможность проведения исследования в условиях эксплуатации без остановки оборудования и разборки изделий, низкая чувствительность измерений, сложность определения вида повреждения и др.) и случайный характер распределения самих повреждений и их параметров (глубина, угол раскрытия и расположение плоскости симметрии трещины, одновременное наличие различных видов повреждений и др.) требуют создания новых способов и испытательного оборудования для обнаружения дефектов поверхности. Преимуществами приборов, принцип действия которых основан на использовании лазерного излучения, являются бесконтактность, высокая информативность, быстродействие, возможность работы в реальном масштабе времени. Подобные измерительные приборы имеют существенное превосходство перед другими средствами контроля состояния поверхностей деталей и применяются для обнаружения поверхностных трещин, дефектов сварных швов и резьб, определения шероховатости и износа поверхности [1-2].

В данной работе приводятся методика и результаты исследования зависимости отража-





Рис. 1. Схема определения интенсивности излучения в отражённом сигнале при наличии поверхностного дефекта (а) и распространение излучения точечного источника в трещине (б): 1 - деталь, 2 - плоскость наблюдения, 3 - плоскость измерения интенсивности излучения в отражённом потоке, 4 - плоскость симметрии трещины

тельной способ-ности конструкционных материалов от состояния поверхности, вида повреждений поверхностного слоя, энергетического соответствия пространственно-временных характеристик отраженного сигнала различным видам дефектов и влияния характеристик зондирующих лазерных пучков (диаметра пятна, угла падения излучения, длины волны, интенсивности источника излучения) на результаты измерений.

Для выявления зависимости величины отраженного сигнала от параметров оптической системы (диаметра пятна, угла падения излучения, диаметра приемного объектива) и геометрических параметров дефекта рассмотрим изменение интенсивности зеркально отраженного излучения при сканировании по поверхности с трещиной произвольного угла раскрытия 2γ (рис.1,а). При распространении излучения точечного источника в трещине (рис.1,б) и постоянном коэффициенте отражения,

$$\varphi_1 = \pi/2 - \alpha - \gamma, \qquad (1)$$

 $p_1 = 2\phi_1 + \alpha = \pi - \alpha - 2\gamma$ из треугольника ABO:

$$\pi/2 - \varphi_1 + \pi/2 - \varphi_2 + 2\gamma = \pi ,$$

$$\varphi_2 = 2\gamma - \varphi_1 = \alpha + 3\gamma - \pi/2,$$
 (2)

$$\beta_2 = \pi/2 - \gamma - \varphi_2 = \pi - \alpha - 4\gamma,$$

а для произвольного значения n:

$$\beta_n = \pi - \alpha - 2n\gamma,$$

$$\varphi_n = -(\pi/2 - \alpha - (2n-1)\gamma),$$
 (3)

где α - угол падения излучения на исходную поверхность; ϕ_1 - угол падения излучения на поверхность трещины; β_1 - угол между отраженным поверхностью трещины излучением и вертикалью при первом отражении; ϕ_2 , β_2 - угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при втором отражении от поверхности трещины; ϕ_n , β_n - угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при выходе из трещины; γ - половина угла раскрытия трещины; n - число переотражений излучения.

Отметим, что после отражения от поверхности трещины излучение идет вниз,

если $\phi_n < 0$ вверх, если $\phi_n > 0$.

Соотношение углов α и γ, для которых направление распространения излучения на выходе из трещины, соответствует направлению зеркально отраженного от исходной по-

верхности излучения и определяется в случае $\beta_n = \alpha$, $\gamma = (\pi/2 - \alpha)/n$. При падении излучения источника с квадратным сечением с равномерным распределением мощности на поверхность с трещиной, когда приемный объектив также имеет квадратное сечение со стороной B_2 и расположен под углом β к нормали к поверхности, значение х (смещение светового пятна относительно края трещины), при котором излучение, выходящее из трещины, попадает на приемный объектив, удовлетворяет неравенству:

$$H_2 tg\gamma < x < H_2 tg\gamma + B_1 / \cos \alpha, \qquad (4)$$

где $H_2 = B_1$ - глубина трещины. Момент, при котором отраженное трещиной излучение начинает попадать на объектив, соответствует $x_1 = x$, тогда максимальное значение отраженного трещиной излучения попадает на приемный объектив при $x = 2H_2$ tgy. Затем значение этой величины снижается и становится равным нулю, при $x = H_2$ tgy + $B_1/cos\alpha$.

Отношение величины сигнала W при наличии трещины к величине сигнала на бездефектной поверхности W_0 , при n = 2 для $H_2 tg\gamma < x < 2H_2 tg\gamma$ определяется выражением:

$$\begin{split} W &= B_{1}/\cos\alpha - x + A_{2}^{2} (x - x_{1}), \quad (5) \\ W_{0} & B_{1}/\cos\alpha & A_{1} B_{1}/\cos\alpha \\ a & \text{для } 2H_{2} \text{tg}\gamma < x < H_{2} \text{tg}\gamma + B_{1}/\cos\alpha, \\ W &= x - 2H_{2} \text{tg}\gamma + A_{2}^{2} (x_{2} - (x - B_{1}/\cos\alpha), \quad (6) \\ W_{0} & B_{1}/\cos\alpha & A_{1} B_{1}/\cos\alpha \end{split}$$

где А₂ - коэффициент отражения поверхности трещины, А₁ - коэффициент отражения бездефектной поверхности. При этом доля излучения, попавшего на объектив после переотражения в трещине для соотношения углов ү $=(\pi/2 - \alpha)/n$, определяется координатой пятна х и не зависит от высоты расположения объектива над поверхностью Н₁. Аналогичная картина распространения излучения в трещине будет наблюдаться, при всех четных значениях n и неизменном значении ширины трещины. Условие $\beta_n = \alpha$ также выполняется при уменьшении угла раскрытия трещины. Координаты x_1 и x_2 имеют те же значения, что и для n = 2, угол выхода излучения из трещины β, соответствует углу β_2 при n = 2. Значения W/W₀ определяются в соответствии с выражениями (5) и (6),во второе слагаемое вместо A_2^2 входит A_2^n . При уменьшении угла раскрытия трещины данное условие выполняется при n = 2 и увеличе-



Puc. 2. Распространение излучения в трещине при увеличении угла раскрытия трещины на величину 2Δγ (*a*) и распространение излучения в трещинах с углами 2γ и 2(γ+Δγ) (б)

нии значений углов α и β_n. Для нечетных значений п излучение выходит из трещины в направлении источника.

Рассмотрим случай, когда половина угла раскрытия трещины увеличивается на $\Delta\gamma$ (рис.2) и определим характеристики пучка, выходящего после переотражения из трещины при прежнем значении угла падения излучения $\alpha = 30^{0}$ и глубины трещины ($H_{2} = B_{1}$).

В соответствии с условием (3), излучение выходит из трещины под углом $\beta_2 = \beta_2 - 4\Delta\gamma$, $\beta_1 = \beta_1 - 2\Delta\gamma$, $\beta_1 = \pi/2 - 2\Delta\gamma$, а ширина выходящих из трещины пучков $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta x^2 = x_2^2 - x_1^2$. Здесь знак ' соответствует трещине с углом $\gamma + \Delta\gamma$. Если для трещины с углом γ все излучение, попадающее в трещины с углом $\gamma + \Delta\gamma$ под углом β_2 , то для трещины с углом $\gamma + \Delta\gamma$ под углом $\beta_2'= \beta_2 - 4\Delta\gamma$ распространяется излучение, попадающее в трещину при $x_{\mu} < x < x_{ofp}$, имеет следующие параметры: $x_{\mu} = H_2 tg(\gamma + \Delta\gamma) - tg\gamma$, $S = 2H_2 tg(\gamma + \Delta\gamma)$, $S/B_1 = 2tg(\gamma + \Delta\gamma)$. В частности, при $\Delta\gamma = 3^0$ S/B₁ = 1,3.

Определим значение x_{obp} - координаты изменения направления сигнала. Из рис.2, а следует:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{o \delta p} + \mathbf{h}_{o \delta p} \mathbf{t} \mathbf{g} \alpha + \mathbf{h}_{o \delta p} \mathbf{t} \mathbf{g} (\gamma + \Delta \gamma) &= 2 \mathbf{H}_2 (\mathbf{t} \mathbf{g} (\gamma + \Delta \gamma), \\ \mathbf{h}_{o \delta p} &= (\mathbf{x}_{o \delta p} + \mathbf{h}_{o \delta p} \mathbf{t} \mathbf{g} \alpha) \mathbf{c} \mathbf{t} \mathbf{g} \beta_1', \end{aligned}$$

Тогда момент, когда излучение, выходящее из трещины, начинает попадать на приемный объектив, определится условием (рис.2,б):

$$D_{1} < 0,$$

$$D_{1} = x_{1} - x - (tg\alpha - tg\beta_{2})(H_{1} - 0,5 B_{1}sin\alpha),$$

$$x_{1} - x < (tg\alpha - tg\beta_{2})(H_{1} - 0,5 B_{1}sin\alpha). (8)$$

Излучение, выходящее из трещины, полностью попадает на приемный объектив при условии:

 $\begin{array}{l} D_2'<0, D_1">0,\\ D_1''=x_1'-x+B_1/\cos\alpha-(tg\alpha-tg\beta_2')(H_1-0,5\ B_1\sin\alpha),\\ x_1'-(x-B_1/\cos\alpha)<(tg\alpha-tg\beta_2')(H_1-0,5\ B_1\sin\alpha),\\ D_2'=x_2'-x-(tg\alpha-tg\beta_2')(H_1-0,5\ B_1\sin\alpha),\\ x_2'-x<(tg\alpha-tg\beta_2')(H_1-0,5\ B_1\sin\alpha). \end{array} \tag{9}$

Излучение выйдет за границы приемного объектива при условии:

$$D_{2}^{"} < 0,$$

$$D_{2}^{"} = x_{2} - x + B_{1}/\cos\alpha - (tg\alpha - tg\beta_{2})(H_{1} - 0.5 B_{1}\sin\alpha),$$

$$x_{2} - (x - B_{1}/\cos\alpha) < (tg\alpha\alpha - tg\beta_{2})(H_{1} - 0.5 B_{1}\sin\alpha).$$
(10)

Соотношения (4), (5), (8) - (10) позволяют построить зависимости изменения относительной величины сигнала W/W_0 от значения координаты x (рис.3,а).

Для экспериментального подтверждения теоретических зависимостей влияния формы трещины (угла раскрытия трещины) и расположения плоскости симметрии трещины) на изменение интенсивности излучения, отраженного от поверхности использовался источник с равномерным распределением интенсивности излучения, отраженного излучения круглого сечения. Приемный объектив с круглым сечением устанавливался над исследуемой поверхностью на высоте H₁, диаметр приемного объектива был равен диаметру источника излучения. Угол падения излучения составлял α =30°. Угол α_2 определял расположение плоскости наблюдения относительно исследуемой поверхности и был равен



Рис. 3. Теоретические (a) и экспериментальные (б) зависимости изменения относительной величины сигнала для $\alpha = 30^{\circ}$ и различных значений угла раскрытия трещины (a) и различных положений плоскости симметрии трещины (б): 1- $\gamma = 30^{\circ}$, n=2, $S/B_1 = 1,15$; $2 - \Delta \gamma = 3^{\circ}$, $B_1/H_1 = 1$, n=2, $S/B_1 = 1,3$; $3 - \Delta \gamma = -3^{\circ}$, $B_1/H_1 = 1$, n=2, $S/B_1 = 1,019$; $4 - n \rightarrow \infty$, $B_1/H_1 = 1$, $S/B_1 = 1,3$; $5 - n \rightarrow \infty$, $B_1/H_1 = 1$, $S/B_1 = 1,019$; $6 - \varphi_1 = 0^{\circ}$; $7 - \varphi_1 = -3^{\circ}$, $8 - \varphi_1 = 3^{\circ}$, $9 - \varphi_1 = -5^{\circ}$, $10 - \varphi_1 = 5^{\circ}$

0, если плоскость наблюдения перпендикулярна направлению распространения зеркально отраженного излучения от бездефектной поверхности. Относительная ширина трещины для всех случаев была равна S/D₂=1,15. Относительная глубина трещины S/H, изменялась в диапазоне $S/H_2 = 0,65...1,44$, $S/H_2 = 0,65$ соответствовала $\gamma = 18^{\circ}$, S/H₂=1,44 соответствовала γ $= 35,8^{\circ}$ (S - ширина трещины, H₂ - глубина трещины). Как показывают измерения, при $\alpha_2 = 0^0$ и $\alpha = \gamma$ относительная величина сигнала не зависела от высоты расположения приемного объектива над поверхностью, и при всех значениях Н, кривая имела один и тот же вид. Здесь введены обозначения: ү - угол раскрытия трещины, ф. - угол поворота плоскости симметрии трещины вокруг линии пересечения плоскости симметрии трещины с исходной поверхностью, φ₂ - угол наклона плоскости симметрии трещины к плоскости, перпендикулярной данной плоскости. При S/D₂>1 значения относительной величины сигнала W/W, не зависели от соотношения ширины трещины и диаметра пятна, вид кривой определялся конфигурацией трещины (значениями углов ү, ф₁ и ф₂). При S/D₂<1 для той же трещины значения относительной величины сигнала W/W₀ возрастали: при S/D₂ $\rightarrow 0 \text{ W/W}_0 \rightarrow 1$ для всех точек поверхности, независимо от наличия дефектов, выявление трещин невозможно (этот вывод вытекает из зависимостей математической модели). Максимальное значение относительной величины сигнала на поверхности трещины при $\alpha = \gamma$ соответствовало центру трещины $(x/D_2 = S/2D_2)$ $+ 1/2\cos\alpha$) и было равно при четном значении числа переотражений в трещине $W/W_0 = A^{(n-1)}$,

где А - коэффициент отражения поверхности трещины, n - число переотражений в трещине. При нечетных значениях n и $n \rightarrow \infty$ (n>6,S/H₂<1) W/W₀ \rightarrow 0 для указанного значения x/D₂ при S/D₂>1.

При уменьшении угла раскрытия трещины максимум на кривой смещался в сторону приемного объектива. Величина максимума и его смещение зависели от угла раскрытия и глубины трещины, а также расстояния от поверхности до приемного объектива.

Заметим, что изменение положения плоскости наблюдений (α₂=0⁰) оказывает существенное влияние на форму кривой W/W₀ (рис.3,б). Для α= $\gamma = 30^{\circ}$ так же, как и при $\alpha_{\gamma} = 0^{\circ}$, сохраняется значение относительной величины сигнала в максимуме и расположение максимума при всех значениях $\alpha_2 = 0^{\circ}$. Значение W/W₀ в точках, соответствующих прохождению центра пятна через края трещины (x/D₂=0,577 и x/D₂=1,73), снижается с ростом α₂. Для трещин с углами α-γ характерно появление максимумов при x/D₂= 0,8...0,9, значение W/W_0 в максимуме возрастает с ростом α_2 , при х/D₂=1...1,6 наблюдается минимум, значение W/W_0 в этой точке снижается с ростом α_2 . Для $\gamma = 34^0$ максимальное значение $W/W_0 = 0,67$ при x/D₂=0,9 и W/W₀ = 0 при $x/D_2=1,5$ соответствуют $\alpha_2=75^{\circ}$. Для $\gamma = 27^{\circ}$ и $\alpha_2 = 75^{\circ}$ максимальное значение W/W₀ = 0,85 при $x/D_2 = 0,83$, $W/W_0 = 0$ при $x/D_2 = 1,04$.

Проведенные исследования показали, что расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива H_1 оказывает наибольшее влияние из всех параметров оптической системы на форму кривой W/W_0 . При $H_1/D_2>1$ форма кривой не зависит от значений углов γ , ϕ_1 и

φ, и определяется только шириной трещины S и соотношением ширины трещины и диаметра пятна S/D_2 . Соотношение S/D_2 не оказывает влияния на определение характера трещины при $S/D_2>1$. При $S/D_2<1$ для той же трещины значения относительной величины сигнала W/ W_0 возрастают, при S/D₂ $\rightarrow 0$ W/W₀ $\rightarrow 1$ для всех точек поверхности независимо от наличия дефектов, выявление трещин невозможно. Поворот плоскости симметрии трещины (изменение величины угла ϕ_1) возможно выявить для неглубоких трещин (S/H₂>1) при γ -($\pi/2 - \alpha$)/n и $-5^{0} < \phi_{1} < 5^{0}$. При большем угле поворота трещины и для глубоких трещин значение угла ϕ_1 не влияет на форму кривой, так как излучение, переотраженное поверхностью трещины не попадает на приемный объектив. Наклон плоскости симметрии трещины (изменение величины угла ϕ_2) также приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой сигнала измерений. Изменение положения плоскости наблюдения наиболее существенное влияние оказывает при γ - ($\pi/2 - \alpha$)/n. При $\alpha_2 - 0^0$ и $\phi_1 = 0^0$ и $\phi_2 = 0^0$ появляются максимум в левой части кривой (x/D₂<1) и минимум в правой части (x/ $D_2 \rightarrow 1$), с ростом α_2 возрастает значение W/W₀ в максимуме и снижается значение W/W₀ в минимуме. Несмотря на большую чувствительность к изменению угла раскрытия трещины при $\alpha_2 = 0^0$, изменение ориентации плоскости наблюдения может привести к снижению разрешающей способности метода при $\alpha_{2} \ge 45^{\circ}$, так как поворот плоскости наблюдения при неизменном значении размеров приемного объектива равносилен снижению его площади в плоскости $\alpha_2 = 0$.

Разработанное испытательное оборудование по обнаружению поверхностных дефектов по результатам измерения интенсивности отраженного лазерного излучения при сканировании по поверхности детали включает в свой состав гелий-неоновый лазер ЛГИ-224-1 (I = 0,6328 мкм), стеклянную пластину для формирования опорного сигнала, два оптических ваттметра поглощаемой мощности ОМЗ-65 для регистрации сигналов опорного и измерительного каналов, плоские зеркала и собирающие линзы для направления излучения от источника к исследуемой поверхности и отраженного от поверхности излучения к фотоприемнику, устройство для перемещения образца. Величина опорного сигнала составляла ~ 6% от интенсивности источника излучения.

Были исследованы поверхности следующих образцов: из титанового сплава ВТ-14, из химически полированного алюминия АД-1М, из алюминиевого сплава АД-1М с покрытием на основе полисилоксанового масла, стеклотекстолита АФТ-2П. Профилограммы поверхностей образцов были записаны на профилографе завода «Калибр» модели 250.

Как показали исследования, резкое снижение интенсивности отраженного излучения на величину до 50...98% свидетельствует о наличии царапин, трещин и повреждения покрытий (рис.4,б). Размеры дефекта определяются разностью координат, соответствующих резкому снижению сигнала и его возрастанию до прежнего уровня. Вероятность распознавания дефектов зависит от соотношения размеров пятна излучения на поверхности и дефекта, а также шага сканирования и размера дефекта. Распознавание дефекта невозможно, если его площадь значительно меньше площади сканирующей апертуры и шаг сканирования превышает размеры дефекта. Наибольшая вероятность распознавания дефекта достигается в том случае, если диаметр пятна излучения на поверхности не превышает размеров дефекта и равен шагу сканирования. Разброс величины сигнала W/ W₀ увеличивается с ростом шероховатости поверхности. Искривлению поверхности образца соответствует монотонное повышение или снижение величины сигнала W/W₀ с ростом координаты x/x₀ (образец из химически полированного алюминия с покрытием на основе полисилоксанового масла (рис.4,б)). Изменению шероховатости на участке поверхности образца соответствует изменение среднего уровня величины W/W₀ (образец из стеклотекстолита АФТ-2П; Ra = 7,45 - W/W₀=0,49; Ra=4,8 - W/W₀=1,1 (рис.4,в)).

Износ участка поверхности образца из титанового сплава BT14 (рис.4,а) характеризуется увеличением шероховатости и отклонением средней линии профиля, что соответствует снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца.

Наличие царапин, трещин и повреждений покрытий приводит к резкому снижению сиг-



Рис. 4. Общий вид профилограмм поверхности и зависимости изменения относительной величины сигнала W/W₀ от координаты x/x₀ для образцов из титанового сплава BT 14 (W₀=0,533 мBm) (а), химполированного алюминия с покрытием на основе полисилоксанового масла (W₀ =0,99 мBm) (б) и стеклотекстолита AФT - 2П (W=0,05мBm) (в): x = 1,6 мм, x₀ - чистая поверхность, поверхность, смачиваемая слоем воды толщиной S=1,5 мм, вертикальное увеличение на профилограмме - 5000, горизонтальное - 50

нала W/W₀. Возможно также резкое увеличение интенсивности отраженного излучения (образец из стеклотекстолита (рис.4,в)). Наиболее сильное снижение сигнала отмечается при наличии трещин (W/W₀ \approx 0,03). Наличие воды на поверхности образца приводит к снижению среднего уровня сигнала W₀, величина которого зависит от материала образца. Для образца из титанового сплава BT14 (рис.4,а) слой воды толщиной 1,5 мм приводит к снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца, в 2 раза. Наличие повреждения регистрируется так же, как и на сухой поверхности. При смачивании поверхности образца водой происходит смещение пятна излучения на фотодиоде, величина которого зависит от толщины слоя жидкости.

Существенное уменьшение габаритов испытательного оборудования возможно при использовании полупроводниковых лазеров в качестве источников излучения. Были проведены исследования их флуктуаций мощности, распределения плотности мощности и отклонения излучения в пространстве. Наиболее распространенными материалами для лазерных диодов являются кристаллы, полученные на основе GaAs и InP с активной областью на основе материалов тройных и четверных систем. Примерами таких лазеров являются GaAlAs/GaAlиAlGa-InP/InP лазерные диоды [3]. Преимуществами лазеров с четверной системой являются [4]: изопериодичность гетероструктуры и отсутствие температурных деформаций, связанных с несоответствием параметров решеток подложки и активной области; высокая оптическая прочность зеркал, отсутствие «дефектов темных линий», слабое участие дислокаций в процессе деградации и, вследствие этого, более высокая долговечность и выходная мощность; отсутствие изгибов на ватт-амперной характеристике и большая стабильность оси диаграммы направленности.

По сравнению с другими типами лазерных диодов лазеры с квантоворазмерными структурами имеют в 3 раза меньшее значение порогового тока и более высокое значение характеристической температуры (200К) и, следовательно, более слабую зависимость порогового тока и выходной мощности от температуры активной области и окружающей среды. Как показали исследования, они характеризуются отсутствием изгибов на ватт-амперной характеристике и более высокой дифференциальной эффективностью. Лазеры с квантоворазмерными структурами сохраняют одномодовый режим и длину волны генерации при накачке импульсным током высокой частоты.

Наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантоворазмерными структурами с активной областью на основе материалов четверных систем.

Таким образом, построена математическая модель, описывающая изменение относительной величины сигнала W/W₀ от безразмерной координаты х/В, при сканировании по поверхности (В₁ - поперечное сечение источника излучения) при различных соотношениях значений углов α и γ (угла падения излучения и половины угла раскрытия трещины), когда размер поперечного сечения пучка и ширина трещины приблизительно равны (одного порядка), $\Delta \gamma < \gamma$. На участке поверхности с наличием трещины кривая изменения относительной величины сигнала имеет максимум или минимум в зависимости от глубины трещины. Угол раскрытия трещины, при котором имеется максимум на кривой, зависит от коэффициента отражения поверхности и угла падения излучения. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива Н, оказывает наибольшее влияние из всех параметров оптической системы на форму кривой W/W₀. Поворот плоскости симметрии трещины возможно выявить лишь для неглубоких

трещин (S/H₂>1) при -5⁰<φ₁<5⁰, при большом угле поворота трещины и для глубоких трещин значение угла ϕ_1 не влияет на форму кривой. Наклон плоскости симметрии трещины приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой отраженного сигнала. Изменение положения плоскости наблюдения приводит к появлению дополнительных максимумов и минимумов. Наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантоворазмерными структурами с активной областью на основе материалов четверных систем. Для учета флуктуаций мощности источника излучения в процессе измерений необходимо формирование опорного канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Обнаружение поверхностных трещин оптическим сканированием // Испытательные приборы и стенды: Экспресс-информация.-1988, N 14(59), с.1-8.
- Кукса Н.Н. Влияние площади считывающей апертуры фотоэлектрического дефектоскопа на вероятность пропуска дефекта // Дефектоскопия. - 1984. - N 4.- с.57-64.
- Басов Н.Г., Елисеев П.Г., Попов Ю.М. Достижения и проблемы физики инжекционных лазеров//Нелинейная оптика полупроводниковых лазеров.- М.: Наука, 1986, Тр.ФИАН; Т.166, с.3-14.
- 4. *Кейси Х., Паниш М.* Лазеры на гетероструктурах. Т.1. М.: Мир, 1981.- 299 с.
- 5. *Кейси Х., Паниш М.* Лазеры на гетероструктурах. Т.2. М.: Мир, 1981.- 364.

ESTIMATION OF SURFACE DAMAGES BY OPTICAL METHOD

© 1999 V.I. Mordasov¹, N.A. Sazonnikova¹, V.P. Shorin²

¹Samara State Aerospace University ²Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences

This paper describes the methods and test equipment for laser detection of surface damages such as scratches, cracks and changes of component surface condition due to chemical reactions or abrasive deterioration. The mathematical model of damage recognition probability after reaching of energetic matching between probing signal and geometric parameters of examined surface area is constructed. An experimental estimation of crack angle, crack depth and position of crack symmetry plane influences to radiation intensity distribution in the light spot when the spot reflects from the surface. The advantages of usage of laser diods in compact control-measuring systems on basis of quadruple systems with quantum-well structures are demonstrated.