

# Лазерные технологии обработки материалов, создаваемые в ИПЛТИ РАН

В.Я.Панченко, В.В.Васильцов, В.С.Голубев, А.Н.Грезев,  
В.Д.Дубров, А.А.Карабутов\*, В.С.Майоров, А.Н.Сафонов

---

Концепция научной стратегии ИПЛТИ РАН в области технологий лазерной обработки материалов ориентирована на востребованность его разработок со стороны промышленных предприятий непосредственно, прикладных НИИ и КБ. Разработанные институтом вместе с созданной им кооперацией научных и производственных организаций лазерные технологии и оборудование (индустриальные лазеры, комплексы для лазерной обработки материалов) поставляются на предприятия России и зарубежных стран. В данном сообщении приводятся данные о разработках по следующим направлениям: модификация рабочей поверхности деталей машин и инструмента; перспективные процессы лазерной сварки; лазерная резка конструкционных и перспективных материалов; оптико-акустическая дефектоскопия внутренней структуры материалов.

---

## Введение

Лазерная обработка материалов имеет ряд существенных преимуществ:

1. Высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяют производить обработку только поверхности участка материала без нагрева остального объема и нарушения структуры и свойств, что приводит к минимальному короблению деталей. Кроме того, высокая концентрация подводимой энергии позволяет провести нагрев и охлаждение обрабатываемого объема материала с большими скоростями при очень малом времени воздействия.

2. Возможность регулирования параметров лазерной обработки в широком интервале режимов позволяет разработать обширный ряд методов поверхностной обработки, регулировать структуру поверхностного слоя.

3. Отсутствие механических усилий на обрабатываемый образец дает возможность обрабатывать хрупкие и ажурные конструкции.

4. Возможность обработки на воздухе, легкость автоматизации процессов, отсутствие вредных отходов при обработке определяет высокую технологичность лазерного луча.

5. Возможность транспортировать излучение на значительные расстояния и подвод его с помощью специальных оптических систем в труднодоступные места позволяет производить обработку в тех случаях, когда другие методы применить невозможно.

6. Высокая производительность процессов.

7. Экологическая чистота технологии.

8. Быстрая окупаемость капитальных затрат на оборудование (0,5-1 год).

## 1. Лазерная модификация поверхности материалов

К методам поверхностной лазерной обработки относятся закалка, наплавка и легирование.

В результате исследований, проведенных в ИПЛТИ РАН, выявлены закономерности структурных преобразований в зоне термического влияния различных сталей и сплавов (железо-углеродистых, легированных, а также сплавов алюминия и титана) для каждого вида обработки поверхности и построена физико-математическая модель процесса лазерного термоупрочнения сталей.

Проведена отработка ряда технологических процессов лазерного упрочнения изделий: машиностроения: направляющих обрабатывающих центров, длинномерных изделий, деталей двигателей внутреннего сгорания. Процессы приняты к внедрению

---

\* МГУ им. М. В.Ломоносова

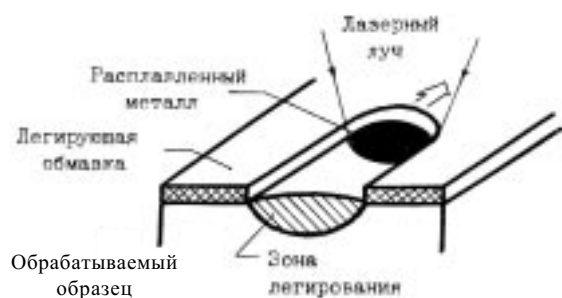


Рис.1. Схема процесса лазерного легирования.

на ПО “Барнаултрансмаш”, на Самарском клапанном заводе, Челябинском моторном заводе, на ПО “Коломенский завод”. Разработан оригинальный манипулятор для лазерной обработки — лазерный обрабатывающий центр (ЛОЦ), а также лазерный технологический комплекс для термоупрочнения колец подшипников турбобуров.

Наиболее распространенными методами лазерной обработки поверхностей являются лазерная наплавка и лазерное легирование. Типичные толщины наплавляемых слоев при лазерной обработке составляют от 0,1 до 3 мм при средней мощности лазерных установок до 5 кВт. Для получения более толстых наплавляемых слоев применяется методы послойной наплавки.

Схема процесса показана на рис. 1.

ИПЛИТ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана и ЦУНИИ КМ “Прометей” выполнили большой цикл совместных исследований по легированию и наплавке поверхностей сплавов. Разработан ряд технологических процессов по восстановлению деталей судового машиностроения, восстановления и упрочнения деталей трансмиссий ходовой части бронетехники. Проведены исследования процессов создания композитных металлокерамических материалов. Созданы новые композитные высокопрочные толстолистовые материалы с гетерогенным поверхностным слоем толщиной до 10-20 мм с повышенной противоударной стойкостью.

В качестве примера номенклатуры деталей, подлежащих лазерному упрочнению и наплавки в условиях судоремонта, можно указать следующие: головка поршней главных судовых дизелей типа “МАН”, “Зульцер”, вал ротора газотурбинного нагнетателя, вал вертикальной передачи двигателя Д100, распределительные валы вспомогательных ДВС.

Открывают большую перспективу проведенные исследования по лазерной наплавке и легированию, в том числе закалке из расплава, для получения положительных структурных изменений в зоне

обработки для сталей 20,45, 40X, 38ХМН, 40ХН2МА, 20X13, 40X13, X18H10T, У10, 9ХНФ и др., бронз БрФЖНМуЭ-4-4-1, БрАМу 9-2, БрОЦ10-2, алюминиевого сплава В-85, а-титановых сплавов и других материалов.

Проведены исследования и разработаны процессы лазерного поверхностного легирования сталей и сплавов, в том числе лазерного борирования и азотирования. Глубина зоны легирования достигает 2-3 мм, а твердость 12000-20000 МПа. Испытания показали, что лазерное легирование обеспечивает повышение стойкости сталей к гидроабразивному изнашиванию в 2,8-3,0 раза, к ударно-абразивному изнашиванию в 1,5-1,8 раза.

В рамках международной программы “ЭВРИКА” по проекту “Гефест” совместно с институтами Польши и Украины разработаны основы технологии восстановления и увеличения ресурсных характеристик штампового и металлообрабатывающего инструмента с использованием мощных (до 5 кВт) технологических CO<sub>2</sub>-лазеров [1].

В проекте участвовали: Институт обработки металлов, г. Познань (Польша); Технический Университет, г. Ченстохов (Польша); ИПЛИТ РАН (Россия); МГТУ им. Н. Э. Баумана (Россия); ИЭС им. Е.О. Патона (Украина); Металлургический комбинат, г. Сочов (Польша). Получены результаты по разработке технологии лазерной модификации поверхности (закалка, легирование) штампового инструмента для производства деталей в автомобильной промышленности.

Выбраны и разработаны методики лазерной обработки поверхностей с использованием мощного технологического CO<sub>2</sub>-лазеров МТЛ-2,5 с уровнем средней мощности излучения до 3,0 кВт и специализированного пятикоординатного манипулятора типа ВИСП 125-А.

Проведенные исследования показали, что лазерную наплавку изношенных деталей можно заменить на лазерное легирование тугоплавкими и высокотвердыми компонентами типа мелкодисперсного бора.

Лазерная закалка образцов штампового инструмента показала высокую технологичность процесса. Получена твердость закаленного слоя (по глубине не менее 0,5 мм) до 60 HRC, что является необходимым для эффективной работы штампов. Такая твердость получена как в процессе только лазерной закалки, так и в процессе лазерной закалки после предварительной термообработки деталей.

Учитывая температурный режим и характер ударных нагрузок в условиях работы штампового инструмента, рекомендуется применять предвари-

тельную закалку деталей при  $t_{\text{зак}}=1040^{\circ}\text{C}$  с последующим отпуском при  $t_{\text{отп}}=650^{\circ}\text{C}$  в совокупности с лазерной обработкой при мощности излучения примерно 2 кВт и скорости обработки 1,6 м/мин.

Испытания обработанных образцов на стендах в Институте обработки металлов (Польша) дали положительные результаты.

На основе полученных данных заложены основы разработки конкретных технологий лазерного упрочнения и легирования штампового инструмента для автомобильной промышленности.

## **2. Перспективные процессы лазерной сварки**

ИПЛИТ РАН разрабатывает технологию и оборудование для лазерной сварки (ЛС) перспективных материалов и изделий, прежде всего листов из алюминиевых сплавов и стальных труб.

Технология лазерной сварки основана на применении излучения мощных  $\text{CO}_2$  лазеров (единицы и десятки кВт), разработанных и выпускаемых в ИПЛИТ РАН.

Отличительной особенностью сварки мощными лазерами является получение так называемого “кинжального” проплавления, характеризующегося значительной глубиной при малой ширине шва. В головной части формирующегося шва поддерживается парогазовый канал, обладающий динамической стабильностью, что обеспечивает проникновение лазерного луча вглубь материала. На передней стенке канала происходит плавление, жидкий расплав по стенкам канала переносится в хвостовую часть ванны расплава и затвердевает, формируя шов.

В ИПЛИТ РАН освоена технология лазерной сварки шестерен коробки передач автомобилей, нержавеющей труб, гидротолкателей топливной аппаратуры, карданных валов, корпусов аэрозольных баллончиков, корпусов топливных фильтров. Ведутся работы по технологии лазерной сварки газо- и нефтепроводных труб, деталей из алюминиевых сплавов для авиастроения, корпусных деталей из титановых и высокопрочных сталей для оборонной промышленности [2]. Приведем основные параметры процесса сварки для нескольких примеров:

1. Высокоскоростная лазерная сварка толсто-стенных труб из нержавеющей стали. Диаметр труб до 40 мм, толщина стенок до 5 мм, скорость сварки до 15 м/мин. Лазер ТЛ-5М (трубные заводы в Москве и в Днепропетровске).

2. Лазерная сварка несущих алмазный абразив зубьев пил для распиловки камня. Толщина пилы 3-10 мм. Лазер ТЛ-5М (5 кВт).

3. Высокоскоростная лазерная сварка консервных банок. Толщина стенок 0,15-0,25 мм. Скорость сварки до 30 м/мин. Лазер ТЛ-5М (5 кВт).

4. Лазерная сварка магистральных газо- и нефтепроводов. Толщина стенок 10-15 мм. Скорость сварки 3 м/мин. Лазер ТЛ-10 (10 кВт).

При разработке технологий лазерной сварки труб ИПЛИТ РАН сотрудничает с ИЭС им. Е.О. Патона [3] в части исследований работоспособности сварных соединений.

В институте ведутся также теоретические работы [4,5] по выявлению механизмов гидродинамических неустойчивостей расплава при глубоком проникновении интенсивного лазерного пучка в металл в процессе лазерной сварки.

### *Лазерная сварка труб нефтепроводов*

В ИПЛИТ РАН созданы технология и оборудование лазерной сварки труб больших диаметров, применяемых в нефтепромышленности, выполнены исследования свойств полученных сварных соединений и проанализирована экономическая выгода применения лазерной сварки. Эти исследования выполнены с образцами из новых сталей, которые планируется использовать для сварки труб в ближайшее время, для повышения их эксплуатационных характеристик.

Старение систем магистральных газонефтепроводов выдвигает задачу обеспечения их безопасности и надежности в ряд важнейших научно-технических проблем. Анализ аварийности показывает, что после 10 лет эксплуатации интенсивность отказов трубопроводов начинает резко нарастать. Отказы сварных соединений являются первой по частоте причиной отказов. Срок службы нефтепроводов в значительной мере определяется коррозионной стойкостью металла сварных швов и соединений. Одним из видов коррозионного разрушения трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Западной Сибири, является сульфидное растрескивание, которому сопутствует охрупчивание в околошовной зоне.

Выявляемые при диагностике дефекты сварных соединений трубопроводов часто не удовлетворяют требованиям известных норм дефектности, регламентированных российскими СНИП и американскими API. Применение указанных норм для отбраковки сварных соединений по результатам диагностики в ряде случаев неэффективно из-за консервативности оценок по критериям работоспособности. Требования этих норм к качеству сварных соединений традиционно формировались в основном исходя из традиционной возможностей технологии аргонодуговой сварки (АДС).

Актуальность выполнения настоящей работы подтверждается интенсивным расширением использования процессов лазерной сварки (ЛС) при производстве труб, в т.ч. большого диаметра с повышенной толщиной стенки высокомоощными CO<sub>2</sub> лазерами [6].

Лазерная сварка обладает рядом выгодных отличий от традиционно применяемой для производства труб дуговой сварки. Эти отличия обусловлены, в первую очередь, высокой концентрацией энергии. В результате сварные соединения труб, выполненные лазерной сваркой, имеют принципиально отличное конструктивное исполнение и специфические физические характеристики. При лазерной сварке обеспечивается равнопрочность шва с основным металлом при высоких значениях пластичности и ударной вязкости. Лазерная сварка обеспечивает высокие скорости охлаждения при кристаллизации шва и минимальное пребывание металла шва и околошовной зоны при высоких температурах. Эти условия обеспечивают мелкодисперсную структуру околошовной зоны, которая при ЛС почти в четыре раза мельче, чем при АДС.

Малая ширина зоны термического влияния (0,5-3 мм) практически исключает её водородонасыщение.

Эти свойства объясняются, главным образом тем, что сварочная ванна при ЛС гораздо меньше, чем при АДС. Это приводит к высоким скоростям охлаждения (до 800°С/с). При АДС скорость охлаждения в 10-20 раз меньше. Твёрдость в зоне сварного шва при ЛС намного выше, чем при АДС.

Прочность шва, полученного лазерной сваркой превышает по прочности швы полученные при электронно-лучевой сварке для легированных сталей. По сравнению с дуговой сваркой лазерная сварка при более высоких скоростях обеспечивает более высокие прочностные характеристики шва.

Лазерная сварка труб конечной длины или формуемых непрерывно из рулонной полосы может осуществляться традиционным способом (одно- и двухсторонняя сварка плавлением, включая использование присадочных материалов), а также в сочетании с другими известными способами подогрева (токами высокой частоты) или сварки (лазерно-дуговая сварка).

В ИПЛИТ РАН разрабатываются основы технологии лазерной сварки труб больших диаметров использующихся в нефтепромышленности. Разработан опытный стенд для сварки труб длиной 2 м, диаметром 530 мм, с толщиной стенки 8 мм лучами от двух CO<sub>2</sub>-лазеров, мощностью 3 и 5 кВт с подачей присадочной проволокой. Марка стали трубы

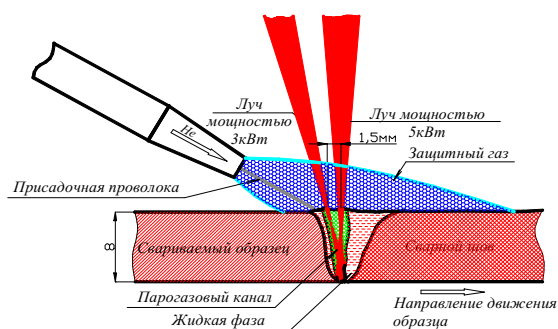


Рис.2. Схема зоны сварки излучениями от двух лазеров.

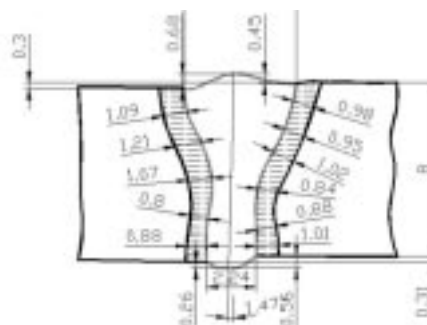


Рис.3. Топография макрошлифа, выполненного двухлучевой сваркой.

08ГФБАА (класса прочности К60), марка присадочной проволоки Св-08Г2С.

Использование двух источников лазерного излучения (рис.2) способствует получению более высоких параметров качества шва. высокую однородность зоны термического влияния (рис.3), большую кинжалность, отсутствие дефектов корневой зоны.

#### Лазерная сварка алюминиевых сплавов АМгб и 1420

Соединения крупногабаритных тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов, полученные аргонодуговой сваркой, обладают рядом дефектов: наличие пор, оксидных включений, существенных остаточных деформации, провисание шва. Это приводит к большому проценту отбраковки изделий. Исследования, выполненные в ИПЛИТ РАН, позволили выбрать два направления уменьшения дефектообразования: использование присадочной проволоки и применение высококонцентрированного источника энергии — лазерного излучения.

Высокая отражательная способность, высокая удельная теплопроводность, высокая жидкотекучесть, низкая температура плавления металла, высокая температура плавления оксидной пленки создают неблагоприятные условия для сварки. Наличие

тугоплавкой оксидной пленки затрудняет сварку толщин выше 2,5 мм, и процесс лазерной сварки начинается только при определенной критической мощности излучения (до нескольких кВт). Наиболее подходящим является способ сварки с использованием поглощающих покрытий в комбинации с присадочной проволокой.

Применение присадочной проволокой диаметром 0,2-0,4 мм для сварки сплавов АМг6 и 1420 толщиной 2 мм обеспечивает повышение эффективности процесса лазерной сварки (полного КПД на 21%). Достигнуто отсутствие критической пороговой мощности, характерной для лазерной сварки соединений из алюминиевых сплавов. Это обеспечило не скачкообразное, а плавное увеличение глубины проплавления с ростом вводимой энергии лазерного излучения.

Достигнуто снижение уровня пористости по сравнению со сваркой без присадочной проволоки с 7 до 0,7 % в случае АМг6 и с 10 до 2% — в случае 1420.

Достигнуто повышение величины допусков сборки под сварку. Не происходит снижения статической прочности в случае, если величина зазора не превышает 13,2% от толщины (при сварке без присадочной проволоки она не должна превышать 3,3%), а величина смещения кромок не превышает 30% (при сварке без присадочной проволоки она не должна превышать 13,2%). Указанные нормы допустимости дефектов обеспечивают уровень 80% статической прочности стыковых соединений при условии, что эти соединения выполнены на оптимальных режимах лазерной сварки с использованием присадочной проволоки.

Результаты экспериментов по влиянию применения присадочной проволоки на склонность сварных соединений сплавов АМг6 и 1420 к образованию горячих трещин (по ГОСТ 26389-84) на технологических пробах позволили сделать вывод, что применение присадочной проволоки не снижает технологической прочности сплавов.

На основе полученных результатов разработаны рекомендации, позволяющие организовать технологический процесс лазерной сварки сплавов АМг6 и 1420 толщиной до 2 мм, с использованием присадочной проволоки, в условиях опытно-промышленного производства

### **3. Лазерная резка конструкционных и перспективных материалов**

В ИПЛИТ РАН проводятся экспериментальные и численные исследования фундаментальных меха-

низмов газолазерной резки [7-9], а также конкретные разработки технологий резки различных конструкционных материалов. Целью этих исследований и разработок является создание высокоэффективных и оптимальных процессов резки с высоким технологическим качеством применительно к различным практически важным материалами формам контуров резки. Практическое применение результатов проводимых исследований — выполнение заказов по резке листовых конструкционных металлов для производства конкретных изделий, таких, как броневые щиты, сейфы, двери, кабины, дисковые пилы, медицинский инструментарий, кузовые детали, научное оборудование (например, стальные пластины коллайдера ЦЕРН).

Многие проекты XXI века по развитию энергетики, освоению космоса, созданию новых инструментов требуют применения обработки перспективных материалов. ИПЛИТ РАН в кооперации с Институтом металлургии и материаловедения (ИМЕТ) РАН (профессор Л.И.Иванов) проводит исследования возможностей и технологических режимов лазерной резки таких материалов с использованием  $\text{CO}_2$ -лазеров мощностью до 1,5 кВт, в непрерывном и в импульсно-периодическом режимах (до 3 кГц) генерации излучения, при высоком оптическом качестве лазерного пучка. Исследовались режимы резки следующих материалов: металлов (в частности, хромомарганцевых легированных сталей); графита; керамики (нитрид бора, а также теплоизоляционная высокотемпературная спецкерамика); ряда минералов. Глубина реза составляла до 20 мм, скорость резки до 6 м/мин. Найдены оптимальные значения основных технологических параметров процесса: мощности излучения лазера, частоты повторения импульсов, скорости подачи, фокусного расстояния линзы, заглубления фокуса, рода и давления вспомогательного газа, геометрических параметров газодинамической системы подачи газа. Установлены принципиальная и реальная возможности лазерной резки ряда труднообрабатываемых перспективных материалов с высокими качеством и производительностью процесса.

#### *Лазерная резка листов из алюминиевых сплавов*

Лазерная резка алюминия и его сплавов имеет свои характерные особенности, что связано с оптическими и теплофизическими характеристиками алюминия: низкой поглощательной способностью алюминия для лазерного излучения и большой теплопроводностью алюминия, поэтому сплавы алюминия труднее резать лазером, чем железоуглеродистые сплавы.

Материал АМГ-6

Толщина, мм	Мощность, Вт	Частота, Гц	Скорость, м/мин	Режущий газ	$P$ , бар
1,6	1500	непрерывно	3,3	воздух	6,5
2	1500	непрерывно	3	воздух	5
3	1200	1500	1,4	воздух	6
4	1500	300	0,8	кислород	8
6	1200	2000	0,14	кислород	6

Характерные зависимости скорости резки  $\text{CO}_2$ -лазером алюминиевых сплавов типа АМг или АМц от толщины заготовок приведены на рис.4. В табл. 1 приведены технологические параметры лазерной резки сплава АМГ-6 излучением  $\text{CO}_2$  лазера, полученные в ИПЛИТ РАН.

Реально в производственных условиях скорость резки должна быть не слишком большой, чтобы обеспечить гарантированное прорезание материала и стабильность процесса. Поверхность выполненного лазерным лучом реза на алюминии всегда имеет характерную шероховатость от  $Rz20$  (для толщин  $\sim 1$  мм) до  $Rz100$  (для толщин  $\sim 3-5$  мм).

При резке алюминиевых сплавов на нижней кромке большое количество грата.

Грат (заусенцы и застывшие капли на нижней кромке реза) отсутствует лишь при резке тонких ( $<1-2$  мм) алюминиевых листов с давлением неактивного газа  $>10$  бар. Для больших толщин появление грата предотвратить нельзя, поэтому следует предпринимать меры, чтобы он затем мог быть легко удален. Крупный грат возникает при слишком низкой скорости резания, при низком давлении технологического газа, при высоком положении фокуса

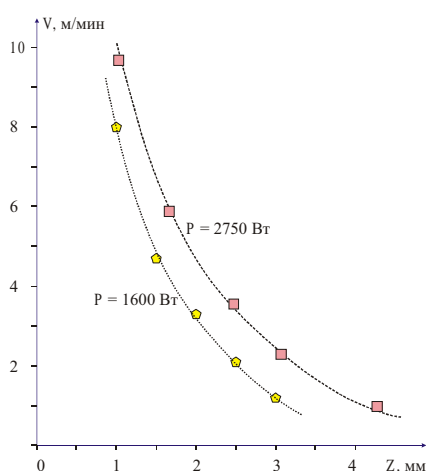


Рис.4. Зависимость скорости резки от толщины листа.  $\text{CO}_2$ -лазер, непрерывный режим генерации,  $\text{TEM}_{00}$ -мода. Материал — алюминиевый сплав АМГ. Газ — азот, давление — 8-12 бар.

лазерного пучка относительно поверхности. Мелкий литой (трудноудаляемый) грат возникает при слишком высокой скорости резания или при низком положении фокуса.

При резке алюминиевых сплавов не слишком больших толщин ( $<1-2$  мм) заметно проявляется преимущество твердотельных АИГ-лазеров (длина волны 1,06 мкм) перед газовыми  $\text{CO}_2$ -лазерами (длина волны 10,6 мкм) [10]. Поглощательная способность алюминия на длине волны АИГ-лазера составляет уже 8% и энергия лазерного луча используется гораздо более эффективно. Кроме того, лазерный пучок с более короткой длиной волны можно сфокусировать в пятно меньшего диаметра, тем самым повысив плотность мощности излучения на материале. Поэтому, например, результаты резки алюминия АИГ-лазером мощностью 500 Вт сопоставимы с резкой  $\text{CO}_2$ -лазером мощностью 1500 Вт. В твердотельных лазерах гораздо легче, чем в газовых, реализуется суперимпульсный режим генерации, когда мощность в импульсе многократно превышает среднюю. Такой режим позволяет перейти на сублимационный процесс резки и достичь максимально высокого качества изготовления деталей.

Лазерная вырезка деталей из алюминиевых сплавов находит все большее применение в таких отраслях, как приборостроение, автомобильная промышленность, авиастроение, космическая техника, и многих других.

#### 4. Лазерная диагностика подповерхностных дефектов

Бесконтактные неразрушающие методы контроля привлекают внимание как при решении проблем машиностроения, так и “интеллектуальных” лазерных технологий. Актуальным и одним из важнейших методов неразрушающего контроля является термоволновая микроскопия.

Концепция “термоволновой микроскопии на основе бегущего луча” заключается в синхронизированном сканировании пятна теплового луча (в форме полосы) и области чувствительности линей-

ного ИК приемника по поверхности. Для эффективной регистрации теплового поля скорость сканирования должна быть сравнимой со скоростью тепловой волны. В настоящее время метод является наиболее перспективным в фототепловой микроскопии. Он дает возможность осуществлять высококонтрастное отображение неоднородностей с высокоэффективностью контроля [11].

Другой новый бесконтактный метод лазерной оптоакустической диагностики в целях неразрушающего контроля основан на стимулированном лазерном возбуждении поверхностных акустических волн и регистрации теплового отклика, который сопровождается дилатацией в акустической волне [12,13]. Метод дает возможность исследовать анизотропию упругих характеристик материала путем анализа угловой зависимости скорости распространения поверхностной акустической волны, что позволяет контролировать дефекты типа вертикальных трещин. Метод особенно удобен для применения к образцам в условиях повышенных температур.

Лазерная оптико-акустическая дефектоскопия позволяет осуществлять оперативное неразрушающее исследование нарушений внутренней структуры материалов.

Принцип действия лазерного оптико- акустического дефектоскопа (ЛОАД) основан на оптико-акустическом эффекте, который заключается в возбуждении коротких ультразвуковых сигналов импульсным лазерным излучением. Импульс лазера, попадая на поверхность объекта, обладающего оптическим поглощением, вызывает мгновенное тепловое расширение области, поглотившей лазерное излучение. Это приводит к возникновению акустических напряжений, форма которых определяется параметрами лазерного импульса и характеристиками среды, поглотившей световую энергию. Варьируя эти параметры, можно добиться сверхкороткого

акустического импульса с заранее известной формой и спектром.[14,15].

Схематическая диаграмма ЛОАД приведена на рис.5.

Импульсное излучение лазера 1 направляется через оптико- волоконный кабель 2 на систему оптической фокусировки излучения 3 прибора ЛОАД. Далее лазерное излучение распространяется через торец прозрачной призмы 4 и фокусируется на поверхности оптико-акустического генератора 5, который обладает высоким оптическим поглощением. В результате на поверхности ОАГ возбуждаются короткие акустические импульсы известной формы, которые распространяются в противоположных направлениях: один из импульсов ( $p1$ ) проходит через прозрачную призму и регистрируется пьезоприемником, другой же ( $p2$ ) добегает до границы раздела ОАГ и воздуха, отражается от этой границы, затем распространяется по тому же пути, что и первый импульс и регистрируется пьезоприемником 6 с некоторой задержкой по времени относительно первого импульса. Предусилитель 7 преобразует сигналы с пьезоприемника в электрические импульсы. Если теперь прислонить ОАГ к исследуемому объекту, то импульс  $p2$  будет распространяться вглубь объекта. Если на пути его распространения встретится неоднородность (типа трещины, пузырька, непровара, слоев с различными термоупругими свойствами), то данный акустический импульс будет отражаться от каждой неоднородности и будет регистрироваться с временной задержкой относительно прихода импульса  $p1$ . По времени задержки импульса  $p2$  относительно импульса  $p1$  можно определить глубину залегания неоднородности, а по форме сигнала — размер неоднородности.

Нами была продемонстрирована возможность применения ЛОАД для исследования нарушений внутренней структуры композитов, пластиков, керамики и металлов. ЛОАД возможно применять для определения пористости различных материалов,

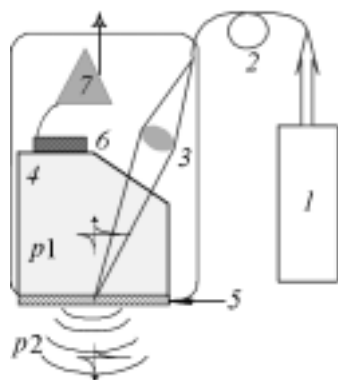


Рис.5. Схема ЛОАД.



Рис.6. Лазерный оптико-акустический дефектоскоп.

определения толщин слоев, проверки склеек в слоистых материалах, а также для определения усталостных напряжений различных материалов. Сканируя приемную часть по поверхности исследуемого объекта возможно создавать двумерные картины внутренней структуры материала.

Фотография установки ЛОАД приведена на рис.6.

### **Литература**

1. Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Golubev V.S., Ilyichev I.N., Savenkov V.A., Shiganov I.N., Plewinski A., Szyndler R., Weinert H., Gierzynska-Dolna M. Application of laser technology in quality improvement of stamping tool working surfaces. Proc. SPIE (2000) vol.4644, p.140-147.
2. Kaitanov A.Yu., Ozersky A.D., Zabelin A. M., Kislov V.S. Static and fatigue strengths of laser welded overlap joints with controlled penetration. Proc. SPIE (2001), vol.4644, p.121-133.
3. Рыбаков А.А., Якубовский В.В., Кирьян В.И., Бендер В.С., Кузьменко В.П., Шитова Л.Г., Грезев А.Н. Исследование работоспособности сварных соединений трубной стали 10Г2БТ, выполненных двухпроходной лазерной сваркой. Автоматическая сварка, 1995, №7 (508), с.12-17.
4. Golubev V.S. Possible Hydrodynamic Phenomena in Deep Penetration Laser Channels. Proc. SPIE (2000) vol.3888, p.244-252.
5. Golubev V.S., Mirzoev F.Kh., Shiganov I.N. Hydrodynamical model of melt components stratification during scanning laser beams interaction with heterogeneous materials. Proc. SPIE (2000) vol.4644, p.100-109.
6. Welding Otto. Laserschweißen von Rohren: Entwicklungstendenzen. Bänder-Bleche-Rohre. 1992. 33, №3. S.68-70.
7. Ledenev V.I., Karasev V.A., Yakunin V.P. On capillary phenomenon during melt removal under gas assisted laser cutting. Proc. SPIE (1999), vol.3688, p.163-168.
8. Bazyleva I.O., Galushkin M.G., Golubev V.S., Dubrovina E.A., Karasev V.A. Thermal losses in process of gas assisted laser cutting metals. Proc. SPIE (2001), vol.4644, p.77-86.
9. Dubrov V.D. Panchenko V.Ya., Golubev V.S. Laser cutting and welding of unspecified materials. Internet. Conf. Program ALT'01 Advanced Laser Technologies. Constanta, Romania, Sept. 11-14, 2001. Publ.: Ministry of Education and Research, Romania.
10. Maiorov V.S. Technological feature of laser cutting by manufacturing parts for aircraft plants. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Industrial Lasers and Laser Applications'98. 27-29 June 1998, Shatura, Moscow Region, Russia. Proceedings of SPIE, V.3688, P.201-205.
11. Karabutov A.A., Kubyshkin A.P. Laser thermal-wave microscopy for remote non-destructive testing. Proc. SPIE (1994) vol. 2257, p.83-88.
12. Karabutov A.A., Kubyshkin A.P., Savateyeva Ye.V. Novel noncontact method of surface acoustic wave registration for nondestructive testing. Proc. SPIE (1995) vol.2713, p.404-413.
13. Kubyshkin A.P., Paul M., Arnold W. Detection of laser generated Rayleigh waves by recording their IR radiation. Proc. SPIE (1999) vol.3688, p.394-400.
14. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991, 306 с.
15. Karabutov A.A., Podymova N.B. Proc. SPIE, v.2772, p.423-430, 1996.