

*О.В. АФАНАСЬЕВА, канд. техн. наук, Н.А. ЛАЛАЗАРОВА, канд. техн. наук,
Е.П. ФЕДОРЕНКО*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Всемерное развитие лазерной техники и технологии – одно из приоритетных направлений ускорения научно-технического прогресса, важный фактор интенсификации различных областей промышленности. До настоящего времени выполнен большой объем исследований по применению лазеров в обработке материалов, сформированы основные научные направления, получен большой материал по работе лазерной техники в промышленности.

Лазерная обработка материалов основана на возможности лазерного луча создавать на малом участке поверхности высокие плотности мощности (до $10^8 - 10^9 \text{ Вт/см}^2$ в непрерывном режиме и до $10^{16} - 10^{17} \text{ Вт/см}^2$ в импульсном режиме), необходимые для интенсивного нагрева или расплавления практически любого материала. Лазерное излучение является не единственным высококонцентрированным источником энергии, пригодным для обработки материалов, однако ряд специфических особенностей, таких как квантованность, когерентность, монохроматичность, направленность, возможность фокусировки в пятно малого диаметра, а также его технологичность, делают лазерный луч уникальным инструментом обработки материалов.

Высокая концентрация подводимой энергии и ее локальность позволяют провести обработку только локального участка материала без нагрева остального объема и нарушения его структуры и свойств, что приводит к минимальному короблению деталей. В результате достигаются экономические и технологические преимущества. Кроме того, высокая концентрация подводимой энергии позволяет провести нагрев и охлаждение обрабатываемого объема материала с большими скоростями при очень малом времени воздействия. В результате не только значительно увеличивается производительность обработки, но также можно получать качественно новые свойства обрабатываемых материалов за счет формирования наноструктур.

Высокая технологичность лазерного луча подразумевает возможность регулирования параметров обработки в очень широком интервале режимов, легкость автоматизации процесса, возможность обработки на воздухе, исключение механического воздействия на обрабатываемый материал, отсутствие вредных отходов, возможность транспортировки излучения и др.

В результате удается реализовать такой широкий круг технологических процессов и методов обработки материалов (сварка, наплавка, маркировка, закалка, резка и др.), который недоступен другим видам инструмента.

В настоящее время в технологических целях используются три типа лазеров: газовые, твердотельные и волоконные. Газовые CO_2 -лазеры мощностью более 1 кВт , надежные в эксплуатации, с автоматизированной системой управления технологического комплекса, широко применяются для различных технологических операций, в том числе для термической обработки. Однако высокая стоимость таких комплексов и их низкая производительность ограничивают применение таких лазеров. Твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате (Nd^{3+} :YAG-лазеры) имеют по сравнению с газовыми ряд преимуществ. Они более компактны, имеют более высокие значения коэффициента полезного действия. Одновременно с этим YAG-лазеры являются более дорогими и требуют больших эксплуатационных расходов. В технологических целях используются YAG-лазеры мощностью $1 - 1,5 \text{ кВт}$, работающие как в непрерывном, так и в импульсном режиме. На сегодняшний день наиболее перспективными технологическими инструментами являются волоконные лазеры. К числу преимуществ

волоконных лазеров следует отнести высокую эффективность (до 50 %), что ведет к более низким эксплуатационным расходам; небольшие размеры позволяют легко встраивать их в существующие системы производства. Однако их стоимость пока остается очень высокой, что также не позволяет говорить об их широком использовании.

При воздействии мощного лазерного излучения в материалах протекают различные физико-химические процессы. Вид этих процессов и характер их протекания определяются температурой, временем нагрева, скоростью нагрева и охлаждения материала, которые, в свою очередь зависят от энергетических и геометрических характеристик лазерного пучка, свойств обрабатываемого материала, геометрической формы и массы обрабатываемого изделия, технологических схем обработки и др.

Цель настоящей работы – исследование возможности использования YAG-лазеров малой мощности (до 10 Вт) для таких технологических режимов, как резка, сварка, термообработка. Традиционно лазеры мощностью менее 0,5 кВт для этих целей не используются [1]. Несмотря на преобладающее мнение [2, 3] о том, что непрерывный режим более подходит для проведения термической обработки, можно предположить, что использование импульсного излучения позволит снизить мощность используемых лазерных устройств. Малая длительность импульсов и возможность фокусировки излучения в пятно малого диаметра позволяют создавать плотности мощности, достаточные для нагрева обрабатываемой поверхности до температур выше фазовых превращений.

При нагревании материала с помощью лазера могут развиваться три основных процесса: 1) лазерный нагрев поверхностного слоя материала до температуры, не превышающей температуру плавления, выдержка при этой температуре и последующее охлаждение; 2) нагрев материала до температур, превышающих температуру плавления, кристаллизация расплава и охлаждение закристаллизовавшегося материала; 3) нагрев материала до температур, превышающих температуру его испарения, пластическая деформация за счет ударной волны, нагрев поверхностного слоя плазмой, образующейся при взаимодействии лазерного излучения с материалом.

Результат действия импульсного лазерного излучения зависит от интенсивности и времени воздействия (длительности импульса). Поэтому эффективная реализация каждого технологического процесса возможна лишь для ограниченных интервалов q и τ [2] (рис. 1).

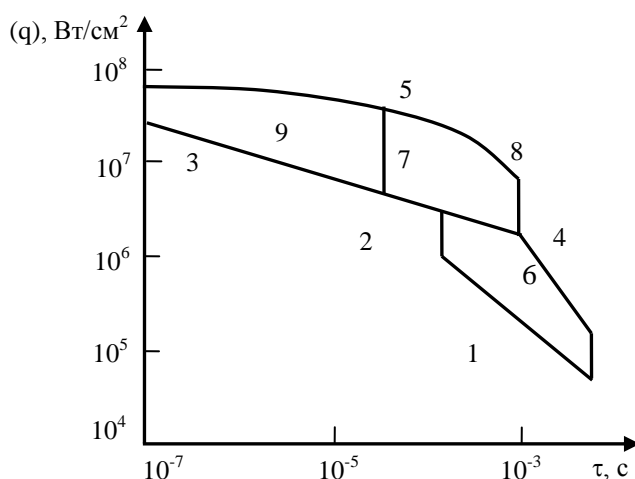


Рис. 1. Области существования различных технологических процессов:
 1 – обработка без плавления (термообработка); 2 – малая глубина проплавления;
 3 – плавление без испарения; 4 – испарение; 5 – образование плазмы; 6 – сварка;
 7 – пробивка отверстий; 8 – резка; 9 – гравировка материала

При $q \leq 10^4 - 10^5 \text{ Вт/см}^2$ происходит нагрев материала без изменения агрегатного состояния вещества. Эта область термообработки (закалка быстрорежущих сталей, отжиг полупроводниковых материалов), а также разделения хрупких материалов за счет разрушающих (раскалывающих) напряжений.

Повышение q до $10^5 - 10^6 \text{ Вт/см}^2$ приводит к плавлению без выброса материала. Это область точечной и шовной сварки, сварки легкодеформируемых материалов, а также лазерного легирования.

Величина $q \sim 10^6 - 10^7 \text{ Вт/см}^2$ позволяет производить нагрев с удалением вещества из зоны теплового воздействия. Благодаря этому можно пробивать отверстия, сверлить, фрезеровать, резать практически все материалы, скрайбировать хрупкие материалы, испарять, производить отбор микропроб для аналитических целей.

При $q > 10^7 - 10^8 \text{ Вт/см}^2$ возникает лазерная плазма, поглощающая излучение и тем самым затрудняющая проведение технологических операций.

Для оценки возможности применения лазеров малой мощности для различных видов обработки было проведено калориметрическое измерение энергии в импульсе. Расчет плотности мощности излучения твердотельного $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ -лазера средней мощностью 5 Вт при диаметре пятна фокусировки $0,8 \text{ мм}$ приведен в таблице.

Длительность импульса τ , мс	Режимы		Плотность мощности q , Вт/см^2
	Энергия в импульсе E , Дж		
2,0	0,70		$1,40 \cdot 10^5$
2,0	1,45		$2,90 \cdot 10^5$
2,0	2,38		$4,70 \cdot 10^5$
2,0	3,55		$7,10 \cdot 10^5$
0,4	0,10		$0,56 \cdot 10^7$
0,4	0,14		$0,79 \cdot 10^7$
0,4	0,21		$1,18 \cdot 10^7$
0,4	0,25		$1,40 \cdot 10^7$

Анализ результатов показывает, что с помощью данного лазера можно проводить закалку с оплавлением и без него, резку и сварку металлов малых толщин, а при уменьшении длительности импульса – и гравировку.

Лазерная закалка основана на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и охлаждения этого участка со сверхкритической скоростью после прекращения воздействия за счет теплоотвода во внутренние слои металла. При этом не требуется применять какие-либо охлаждающие среды, что упрощает технологию термоупрочнения. Лазерная закалка характеризуется малым временем воздействия и обеспечивает отсутствие деформации деталей. Тепловое воздействие при лазерном термоупрочнении, регулируется в широких пределах за счет изменения параметров лазерного излучения и режимов обработки. Это обеспечивает регулирование скоростей нагрева и охлаждения металла, времени пребывания металла при высоких температурах, что позволяет получать требуемую структуру поверхностного участка и соответствующие свойства. Технологические возможности лазерного термоупрочнения позволяют использовать этот процесс в качестве заключительной операции без последующей механической обработки [2, 3].

Ранее было показано [4, 5], что применение импульсных режимов позволяет проводить термическую обработку с помощью YAG -лазера со средней мощностью всего $5 - 10 \text{ Вт}$, при этом на всех режимах наблюдалось оплавление и вспенивание металла в зоне нагрева. Если рассмотреть схему поперечного сечения упрочненной лазерным излучением дорожки, то в нем можно выделить несколько основных зон (рис. 2): *зону оплавления* (зону закалки из жидкого состояния) с максимальной микротвердостью, *зону закалки*, *зону отпуска*, где микротвердость минимальна, и *исходную структуру* материала. В ряде частных случаев некоторые из этих зон могут отсутствовать (например, может отсутствовать зона оплавления при

закалке без оплавления поверхности или зона отпуска при закалке предварительно отожженного металла). Каждая зона в свою очередь может состоять из нескольких слоев и иметь по своему сечению различия в микроструктуре, элементном составе, соотношении составляющих ее фаз и т. п.

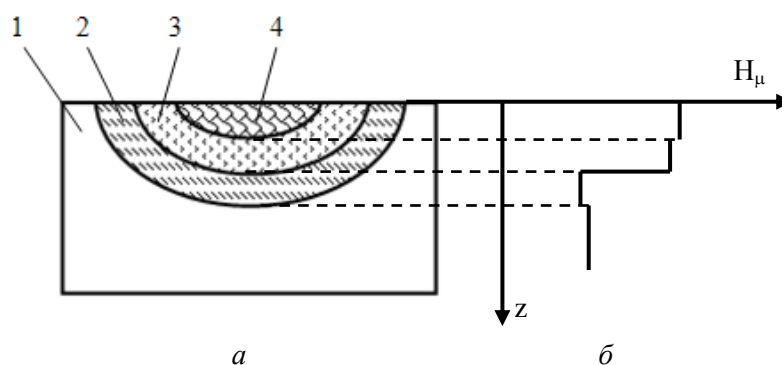


Рис. 2. Схема поперечного сечения зоны лазерной обработки (а) и распределения микротвердости по глубине зоны обработки (б): 1 – исходный металл, 2 – зона отпуска, 3 – зона закалки, 4 – зона закалки из жидкого состояния

Воздействие лазерного излучения на поверхность сплавов позволило получить глубину упрочнения до 0,8 мм при ширине единичных полос 1,2 – 1,8 мм. Для каждой из исследованных сталей микротвердость закаленного слоя была не меньше, чем полученная с использованием значительно более мощных лазеров [6, 7].

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать вывод о возможности поверхностного упрочнения сталей маломощными лазерами при использовании импульсного режима. Однако производительность такого процесса низкая, что не позволяет упрочнять большие поверхности деталей. В этом случае перспективным представляется проведение дальнейших исследований на инструментальных сталях, т.к. для инструмента не требуется значительная площадь упрочнения, а также небольшие детали, например, игла форсунки двигателя.

Лазерная сварка может быть точечной и шовной. С помощью лазерной сварки можно получать высококачественные соединения деталей из нержавеющей стали, никеля, молибдена и др. Высокая мощность лазерного излучения позволяет сваривать материалы с высокой теплопроводностью (медь, серебро). По сравнению с традиционной технологией сварки лазерная сварка отличается высокой производительностью, малой деформацией свариваемых элементов, возможностью подачи энергии в труднодоступные места. Широко используется лазерная сварка в микроэлектронике и точном приборостроении для сварки деталей из тугоплавких материалов. В микроэлектронике лазерная сварка успешно заменяет пайку. Исследование плотности мощности показывает возможность применения твердотельных лазеров мощностью 5 – 10 Вт для сварки. Увеличение длительности лазерного импульса способствует более полному удалению из сварочной ванны нерастворенных газов и уменьшает возможность образования пор после застывания металла, поэтому необходимы дополнительные исследования по подбору оптимальной длительности импульса.

Лазерная сварка в импульсном режиме может использоваться в авиастроении и автомобильной промышленности для соединения тонких деталей из сталей, алюминиевых и титановых сплавов. В большинстве случаев лазерная сварка малых толщин успешно заменяет контактную сварку сопротивлением, обеспечивая более качественное соединение.

Лазерная резка отличается отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал, возникают минимальные деформации, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания. Вследствие этого лазерную резку, даже легкодеформируемых и нежестких заготовок и деталей, можно осуществлять с высокой степенью точности.

Благодаря большой мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность процесса в сочетании с высоким качеством поверхностей реза. Легкое и сравнительно простое управление лазерным излучением позволяет осуществлять лазерную резку по сложному контуру плоских и объемных деталей и заготовок с высокой степенью автоматизации процесса. При проведении процесса лазерной резки следует предусмотреть подачу вспомогательного газа в зону лазерного воздействия.

Проведение резки в импульсном режиме не обеспечивает высокого качества реза. Более целесообразно использовать этот режим для пробивки отверстий. В этом случае также необходимы исследования по подбору длительности импульса.

Следует отметить, что использование твердотельных лазеров для резки и пробивки отверстий возможно только в случае металлических материалов, т.к. неметаллы плохо поглощают излучение с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм.

Лазерная гравировка получила широкое применение во всех областях производства. В микроэлектронике она применяется для маркировки заготовок, изделий и оснастки на всех стадиях разработки и производства, например, для кремниевых пластин. Значительную роль в данном типе обработки играют параметры обрабатываемого материала, в первую очередь теплопроводность и поглощательная способность. Поглощательная способность зависит от длины волны падающего излучения, которая также определяет мощность падающего излучения. Также значительное влияние на процесс гравировки оказывает мощность излучения.

При медленном нагреве непрерывным лазером наиболее важным критерием является отвод тепла вглубь материала. В этом случае точка испарения получается достаточно большой. Для плоских образцов большую роль играет толщина. Если объем подводимой энергии превышает объем энергии, отводимой теплопередачей, происходит плавление материала. Плавление материала чаще всего осуществляется на относительно небольшую величину и не позволяет добиться нанесения хорошо различимых символов, вследствие чего непрерывный режим для лазерной гравировки металлов не применяется.

С увеличением интенсивности (т.е. перехода к импульсным лазерам) существенное влияние начинает оказывать вторичное излучение с поверхности и, как следствие, отвод энергии в окружающую среду. Потери энергии в этом случае могут достигать 40 %. Для уменьшения потерь применяют короткие импульсы со значительными промежутками между ними [3]. Рост плотности мощности активизирует процесс механического разрушения материала совместно с термическим, что способствует выдавливанию всего материала, находящегося в жидкой фазе, и разбрызгиванию его на значительные расстояния, сравнимые и даже иногда превосходящие, диаметр пучка обработки.

В результате проведенных исследований было показано:

1. Несмотря на малую мощность используемого лазера, импульсный режим все же позволяет производить различные виды обработки металлических материалов.
2. Существует оптимальная длительность импульса, позволяющая получать наиболее эффективное воздействие.

Список литературы: 1. *Промышленное применение лазеров* / Под ред. Г.Кебнера. – М. : Машиностроение, 1988. – 280 с. 2. *Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера* / В.С. Коваленко, Л.Ф.Головко, В.С. Черненко. – К. : Техника, 1990. – 192 с. 3. *Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И.* Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М. : МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 664 с. 4. *Особенности применения импульсных лазеров малой мощности для термического упрочнения железоуглеродистых сплавов* / Афанасьева О.В., Мачехин Ю.П., Лалазарова Н.А., Свергун Т.Ю. // II международная конференция "Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития" МРФ-2009. Сб. науч. тр. Т. III. – Харьков : АН ПРЭ ; ХНУРЭ, 2009. – С.125 – 127. 5. *Применение импульсных лазеров малой мощности для поверхностной закалки сталей* / Ю.П. Мачехин, О.В. Афанасьева, Н.А. Лалазарова, Е.Г. Попова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», 2009. – Вып. 3 (59). – С. 97–101. 6. *Сафонов А.Н.* Структура и микротвердость поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов после лазерной закалки // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1996. – №2. – С. 20–25. 7. *Дьяченко В.С.* Влияние режимов импульсной лазерной обработки на структуру и свойства быстрорежущих сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1986. – №9. – С. 11–13.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 08.10.2013