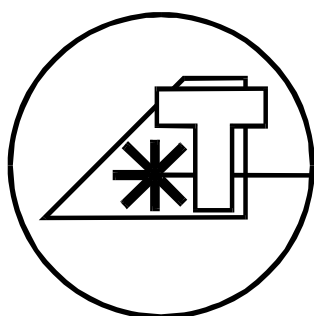


Министерство общего и профессионального образования РФ
Санкт-Петербургский государственный технический университет
ЦНИИ робототехники и технической кибернетики

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И СРЕДСТВА ЕЁ РЕАЛИЗАЦИИ -97

Материалы конференции

Санкт-Петербург
1997

СИСТЕМА ПОДХОДА К РАЗРАБОТКЕ САПР И АСУ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Лопота В.А.

ЦНИИ РТК, г. С.-Петербург

В настоящее время лазерные технологические процессы (ЛТП) обработки материалов широко применяются в промышленности, а выпускаемые технологические комплексы и установки лазерной обработки материалов представляют собой практически стандартное, хотя и специфическое оборудование для металлообработки.

Это произошло благодаря усилиям ученых, инженеров, конструкторов, предпринимателей во всем мире. При этом внедрение лазерной техники и ЛТП обработки материалов происходило в основном на базе экспериментальных данных, полуколичественных и феноменологических теорий, просто поисков удачных конкретных применений. На сегодняшний день эта работа хотя и является важной, но представляет собой экстенсивный путь развития в области лазерной обработки материалов.

На наш взгляд разработка ЛТП обработки материалов (сварки, резки, маркировки, гравировки, клеймения, сверления, наплавки, легирования) достигла к настоящему моменту такого уровня развития, когда их дальнейшее совершенствование и заметное расширение области применения возможно лишь на основе такого подхода, когда с одной стороны обеспечивается необходимый набор технологических параметров обработки за счет экспериментального и теоретического моделирования технологического процесса и создания требуемого для его реализации оборудования, а с другой стороны осуществления текущего контроля и управления в ходе самого технологического процесса, т.е. речь идет о разработке, создании и реализации САПР и АСУ ЛТП. Создание таких систем предполагает наличие физически адекватных теоретических описаний ЛТП, так как эмпирические данные, в силу бессистемности и хаотичности проводившихся до сих пор экспериментальных работ и из-за сложности физической природы ЛТП, не дают полной экспериментальной картины физических явлений, протекающих при лазерной обработке материалов. В данной ситуации единственным решением на первом этапе создания САПР и АСУ ЛТП является разработка системы подхода для планирования экспериментальных и теоретических работ с целью создания полного и физически-адекватного описания технологических процессов лазерной обработки материалов, т.е. их физико-технологических основ. В рамках такого подхода для любого из технологических процессов лазерной обработки можно выделить следующие составляющие физические процессы:

- поглощение и отражение энергии лазерного излучения в ходе лазерной обработки с учетом влияния многократных переотражений (при сварке), условий на поверхности и протекающих на ней химических реакций (при резке и маркировке), влияния температуры на коэффициент поглощения излучения;
- газодинамические процессы при сварке, резке, клеймении, сверлении с учетом взаимодействия паров с излучением и влияния струи газа на форму стенок канала и их стабильность;
- процессы образования плазмы и ее воздействия на лазерное излучение с учетом влияния геометрии и характеристик парогазового канала при сварке, реза при резке, клейма при клеймении, отверстия при сверлении;

- процессы тепломассопереноса в расплаве и твердой фазе с учетом наличия свободных границ;
- диффузионные процессы в жидкой и твердой фазе и особенности твердотельных фазовых переходов.

Результаты проведенного анализа и полученные результаты позволяют заключить, что на этапе разработки САПР достаточно иметь квазистационарное описание ЛТП. Созданные на основе такого описания математические модели ЛТП обработки материалов вместе с банками данных по свойствам материалов, параметрам лазерных технологических комплексов (ЛТК) и установок (ЛТУ) и технологическим приемам, а так же с программным интерфейсом позволяют решить поставленную задачу. Нами разработана квазистационарная математическая модель лазерной сварки металлов с глубоким проплавлением.

Для создания АСУ необходимы динамические, хотя и упрощенные модели процессов, пригодных для создания на их основе алгоритмов управления, работающих в реальном времени, а также информационно-измерительные системы для анализа динамики лазерных технологических процессов с высокой скоростью и точностью и выработки управляющих источником энергии и технологической оснасткой воздействий, а также управляемые по технологическим параметрам ЛТК и ЛТУ. Нами разработана динамическая модель лазерной сварки металлов с глубоким проплавлением, а также серия управляемых по технологическим параметрам сигналами обратной связи лазерных технологических установок для лазерной обработки материалов.

Таким образом, нами созданы отдельные элементы САПР и АСУ ЛТП обработки материалов. Такая система подхода к разработке САПР и АСУ ЛТП применяется во всех наших разработках в области лазерной техники и технологии.

ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРОВ В РОССИИ

Ананьев Ю.А.

СПбГТУ, г.С.-Петербург

Появление лазеров было во многом «спровоцировано» работами по созданию генераторов СВЧ-диапазона (мазеров), в которых ведущую роль играл Физический Институт АН СССР. Лидирующая роль этого института в квантовой электронике сохранилась еще на долгие годы; именно здесь был сформулирован ряд наиболее важных принципиальных предложений по развитию лазерной техники.

Спустя немного времени после того, как Мейман собрал первый макет рубинового лазера, другой группе исследователей удалось, воспроизведя его установку, впервые получить генерацию; вызывает уважения то, что приоритета Меймана они не оспаривали. Вскоре после этого рубиновые лазеры были запущены в ФИАН и ГОИ.

Ученым ГОИ тогда не доставало того понимания процесса генерации, которым уже обладали сотрудники ФИАН, однако в техническом плане ГОИ обладал огромным потенциалом и быстро добился значительного успеха в деле создания все новых образцов лазерной техники. Уже летом 1962 года автору с коллегами удалось достичь генерации нескольких первых типов отечественных лазеров с криогенным охлаждением; летом этого же года была достигнута генерация при солнечной накачке. В течение нескольких последующих лет нами были опубликованы работы, задавшие направление изысканий по основным проблемам техники твердотельных лазеров. Так, мне принадлежат первые отечественные статьи по расчету эффективности вывода энергии из резонатора, по расчету эффективности осветительных систем и распределения излучения накачки по сечению активного элемента, по теории обычно имеющего места многомодового режима генерации, по наблюдению термических деформаций резонатора и т.п. Во второй половине 60-х годов мы переключились почти полностью на решение важнейшей проблемы угловой расходимости излучения, намного опередив в этом деле всех остальных.

Тем временем многие отечественные исследователи добились значительного прогресса и в других разделах лазерной техники. Среди прочих выделяются:

- работы школы Р.В.Хохлова по нелинейной оптике;
- создание перестраиваемых лазеров М.С.Соскиным и др. (Киев)
- создание лазеров на красителях (Б.И.Степанов и др., Минск)
- формулировка идеи газодинамического лазера (В.К.Конюхов и А.М.Прохоров, ФИАН).

В дальнейшем прогресс стал уже не таким быстрым, и новые яркие идеи появляются все реже; однако квантовая электроника продолжает оставаться одним из самых передовых и интересных направлений современной науки.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ, В ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Сухов Ю.Т.

ЦНИИ РТК, г.С.-Петербург

В настоящее время очень важно для коммерческого успеха организаций представить свою деятельность на страницах Web - серверов в глобальной сети Интернет. Все крупнейшие лазерные фирмы мира имеют свой сервер или страницу в этой сети. Например, популярный журнал «Laser Fokus World» представляет на своем сервере многие известные лазерные фирмы и организации по адресу <http://www.lfw.com>.

Российские лазерные фирмы представлены в сети Интернет значительно слабее. Очень мало серверов, специализирующихся на лазерной тематике. Одним из них является наш сервер.

Обычно на страницах серверов сети Интернет содержится следующая информация об организациях:

- наименование организации, логотип, адрес, средства связи;
- направления деятельности;
- сведения о партнерах по научной и производственной деятельности;
- сведения о руководителях организации;
- новости.

Рассмотрим представление организаций, работающих в области лазерной техники и технологии на примере ЦНИИ робототехники и технической кибернетики.

Лазерная технология является одним из основных направлений научно-технической деятельности ЦНИИ РТК. Проводятся фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области исследования физико-технологических основ, разработки теории, создании компьютерных систем моделирования, прогнозирования, оптимизации лазерных технологических процессов сварки, резки, маркировки, клеймения, прецизионной обработки; исследования внутриврезонаторных и внерезонаторных методов улучшения пространственных характеристик излучения, разработки новых оптических резонаторов, расчетов схем оптических резонаторов для углекислотных, твердотельных, эксимерных лазеров, лазеров на парах металлов технологического назначения. Проводятся прикладные, опытно-конструкторские и технологические работы в области разработки лазерных технологических процессов сварки, резки, маркировки, гравировки, клеймения, сверления, прецизионной обработки; разработки и создания средств реализации лазерных технологических процессов, в том числе комплексов и установок для маркировки, гравировки, клеймения, резки, сверления, прецизионной обработки, оптических резонаторов лазеров, систем фокусировки и транспортировки излучения лазеров, технологической оснастки.

Нами разработана концепция и системный подход в развитии исследований в области лазерных технологических процессов обработки материалов, концепция построения лазерных технологических комплексов и установок для лазерной обработки материалов. Разработаны и выпускаются технологические установки для лазерной маркировки, гравировки, клеймения и резки на базе твердотельных и углекислотных лазеров, лазеров на парах меди, новые типы резонаторов для твердотельных и углекислотных лазеров, разработаны компьютерные системы

моделирования процессов лазерной и электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением, комплексы программ для расчетов оптических схем резонаторов различного типа.

В дальнейшем планируется разработать серию лазерных технологических установок нового типа для маркировки, гравировки, клеймения материалов, прошивки отверстий в твердых и сверхтвердых материалах, разработать систему САПР и АСУ технологических процессов лазерной обработки материалов.

Мы участвуем в кооперации с Фраунгоферовским институтом лазерной техники (г.Аахен, Германия) в области моделирования процессов лазерной сварки металлов больших толщин и исследования качества излучения углекислотных лазеров, с Бременским институтом прикладных исследований (г.Бремен, Германия) и фирмой Рофин Синар (г.Гамбург, Германия) в области исследований резонаторов волноводных углекислотных лазеров.

Более подробное описание нашей деятельности, а также сведения об организации и ее руководителях и другие материалы доступны на нашем Web - сервере по адресу: <http://laser.stu.neva.ru>.

На этом же сервере находится разработанная нами информационно-справочная система « Лазеры и лазерные технологии России», на страницах которой мы готовы представлять в сети Интернет все организации, работающие в области лазеров и лазерных технологий.

Справки можно получить по e-mail адресам: ilt@laser.stu.neva.ru, sukhov@laser.stu.neva.ru, vlopota@laser.stu.neva.ru.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ С ГЛУБОКИМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

Туричин Г.А.

СПбГТУ, г.С.-Петербург

Известны попытки описать динамику активной зоны при лазерной сварке с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений. Так, в [1] выведено уравнение для колебаний дна канала, а в [2] - для описания колебаний его радиуса, однако обе эти модели предсказывают лишь затухание колебаний. Объяснить процесс возникновения и поддержания колебаний возможно лишь при совместном анализе динамики глубины и радиуса парогазового канала.

Для теоретического описания динамики активной зоны на основе механики Лагранжа построена динамическая модель процесса лазерной сварки. Вычисление функции Лагранжа было проведено путем отдельного вычисления кинетической и потенциальной энергии зоны взаимодействия луча с материалом. Анализ показал [3], что при типичных для сварки с глубоким проплавлением значениях параметров режима для описания гидродинамики течения расплава можно пользоваться приближением идеальной жидкости. В качестве модельной формы активной зоны выбрана следующая: парогазовый канал представляет собой цилиндр переменной глубины и радиуса, канал проплавления - эллиптический цилиндр, и для этой области построена функция Лагранжа. Для учета мелкомасштабных колебаний поверхности парогазового канала отдельно рассчитаны вклады от возникновения таких колебаний в кинетическую и потенциальную энергию системы, эти вклады учтены при построении функции Лагранжа. Для определения спектра этих колебаний решена задача о колебаниях поверхности парогазового канала с учетом влияния структуры излучения [3].

Диссипативная функция определена путем интегрирования работы сил трения в пограничных слоях по поверхности канала проплавления отдельно для поступательного движения канала со скоростью сварки и для колебательных движений.

В потенциальной энергии учтен вклад только поверхностной энергии. Непотенциальная сила - реакция паровой струи - рассчитана с использованием решения квазистационарной тепловой задачи [4]. Обобщенными переменными в модели

являются: площадь поперечного сечения парогазового канала, его глубина и амплитуды волн на его поверхности. На основе построенного Лагранжева описания по стандартной методике были построены уравнения движения для обобщенных координат - уравнения динамической модели процесса сварки.

Ввиду сложности уравнений динамической модели их подробный анализ возможен лишь на основе численного решения. Для этой цели использовался метод Рунге - Кутты 6 -ого порядка точности. Расчеты проводились для сварки сталей в диапазоне мощностей излучения от 1 до 10 КВт и скоростей сварки от 0.3 до 5 см/с. Начальные условия рассчитывались с использованием квазистационарной модели процесса формирования сварного шва [4]. Для анализа динамического поведения канала рассчитывались не только зависимости его глубины, площади поперечного сечения и амплитуды волн на его поверхности от времени, но и фазовые портреты для этих переменных.

Анализ полученных результатов показывает, что возможны только совместные колебания глубины и радиуса канала [5]. Состояние, при котором избыточное давление в канале равно капиллярному, характеризуется нулевыми силовыми членами в эволюционных уравнениях. Как и следовало ожидать, данное состояние является точкой равновесия, характер которого зависит от параметров режима сварки. Плотное заполнение фазовыми траекториями ограниченных областей на фазовых портретах говорит о турбулентном характере колебаний парогазового канала (данные области являются двумерными сечениями многомерного странного аттрактора). Это и объясняет независимость результатов расчетов от начальных условий (в том случае, когда начальная точка попадает внутрь аттрактора). Размеры и форма аттрактора определяются параметрами режима сварки, что позволяет построить алгоритм контроля и оптимального управления процессом, минимизирующий высоту сечений аттрактора, т.е. амплитуду колебаний глубины или радиуса канала.

Список литературы

1. Виноградов В.А., Ластовирия В.Н., Злочевский С.И. / Описание осевой динамики канала проплавления// ФиХОМ, 1986, 4, с. 83-88
2. J Kroos, U Gratzke, M Vicanek and G Simon / Dynamic behaviour of the keyhole in laser welding// J. Phys. D: Appl. Phys.26 (1993) p.481-486
3. Г.А. Туричин / Гидродинамические аспекты устойчивости парогазового канала при лучевых видах сварки , ФиХОМ, N 4, 1996, с. 74-82

4. V.Lopota, Yu. Sukhov, G. Turichin / Computer simulation of laser beam welding for technological applications. // Proc. of Int. SPIE Conf. on Laser Appl. Eng.(LAE-96), StPetersburg.
5. W. Schulz, B. Fuerst, E.W. Kreutz, G. Turichin / Powerful features for Laser Beam Welding including theoretical aspects //Proceedings of 15 Int. Congress on application of lasers- ICALEO-96, USA

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В УСЛОВИЯХ СВАРКИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Цибульский И.А. , Байкова О.В.

СПбГТУ, г.С-Петербург

Одним из главных вопросов, возникающих при разработке технологических процессов лазерной сварки и поверхностной обработки, является вопрос о свойствах зон металла, подвергшихся высокотемпературному нагреву, а в конечном счете о качестве и возможных дефектах. С целью создания инженерной методики прогнозирования структуры и механических свойств материалов при лазерной обработке, сочетающей в себе как аналитические, так и экспериментальные методы и позволяющей сократить время расчетов в случае компьютерного моделирования данных процессов, нами были проведены экспериментальные исследования формирования структур в зонах лазерного воздействия и расчетные оценки термических циклов в этих зонах. Особенности структурообразований изучались на материалах системы Fe-C. Для исследования были взяты образцы из сталей У8А, 45, 30, 10 и технического железа. Такой выбор материала обусловлен необходимостью оценить влияние количества углерода на характер образующихся структур в сплавах на основе железа при высокоскоростном нагреве и охлаждении, которые характерны для лазерной обработки. Образцы были нормализованы, а затем подвергнуты лазерной обработке CO₂-лазером.

Подробное изучение микроструктуры позволило выделить три следующие зоны: зону проплавления, в которой происходит закалка из жидкого состояния (ЗЛЗ), зона закалки из твердого состояния (ЗТФ) и зона термического влияния (ЗТВ), прилегающая к основному металлу. Оценим скорости охлаждения в ЗТФ при лазерной сварке и поверхностной обработке. Расчет термических циклов сварки показал, что для режима с параметрами: мощность излучения – 3 кВт, скорость сварки - 10 мм/с значения скорости охлаждения от 600⁰ С до 500⁰С составили 40 град/с и ниже. Время пребывания при температурах выше 500⁰ С - порядка 8 с. Проведем оценку скорости охлаждения для режима характерного для лазерной поверхностной обработки: мощность излучения - 1 кВт, скорость обработки 25 мм/с. Воспользовавшись выражением для точечного быстродвижущегося источника, получим диапазон скоростей охлаждения 25...70 град/с. Из сравнения термических циклов следует, что их параметры близки.

Для сталей с содержанием углерода порядка 0,04 % (Fe) структура шва имеет зеренное строение, при этом зерно округлой формы, и с увеличением мощности оно становится более вытянутым в направлении стенок шва. Хорошо видны иглы мартенсита с ростом по направлениям максимального теплоотвода. С увеличением количества углерода в стали от 0,07-0,13 (сталь 10) до 0,3 % (сталь 30), в металле шва балльность игл мартенсита меняется от 10-9 баллов до 7-6 у поверхности, и от 7-6 до 4-3 баллов в корне шва. Металлы с повышенным содержанием углерода, порядка 0,8 % (У8А), на участках оплавления имеют скрытоигольчатую структуру.

ЗТФ в зависимости от количества С и режима обработки имеет структуру неполной закалки. Из-за кратковременности стадии нагрева, приводящей к сохранению гетерогенной структуры в момент зарождения аустенитных центров новой кристаллической фазы, процесс получения мартенситной структуры возможен лишь в местах энергетически обусловленных , а именно в областях соприкосновения

бывших Ф-Ц-пластин . Это подтверждается металлографическим анализом (увеличение количества светлых участков травимости) и значениями микротвердости близкими к значениям закаленной структуры (порядка 500 HV). Изучение структур, полученных в результате лазерной сварки и поверхностной обработки, дает основание заключить, что они аналогичны, также как и механизмы их формирования.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ КООКСИАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЛАЗЕРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ЗЕРКАЛАМИ ПРОСТОЙ ФОРМЫ

Соловьев В.Д.

ЦНИИ РТК, г. С.-Петербург

В большинстве технологических применений лазера к его излучению предъявляются следующие основные требования:

- луч лазера должен фокусироваться в пятно малого размера
- распределение интенсивности излучения в фокальном пятне должно удовлетворять ряду требований.

Решение перечисленных задач предполагает в первую очередь получение лазерного пучка, когерентного по всему его поперечному сечению. Если ограничиться рассмотрением волноводных CO_2 лазеров с формой электродов, образующих коаксиальный волновод, то требуется предпринять усилия по обеспечению когерентности излучения лазера лишь в азимутальном направлении. Эта задача в принципе может быть решена при введении в резонатор некоего устройства, обеспечивающего эффективную связь между различными участками сечения резонатора. Такая связь может быть осуществлена, в частности, с помощью эффекта Тальбота.

Попытка реализации эффекта Тальбота внутри волновода может быть осуществлена несколькими способами. В наиболее простой схеме транспарант, обладающий периодичностью пропускания в азимутальном направлении, помещается вблизи одного из торцов волновода. Это может быть, в частности, амплитудная решетка. Вблизи другого конца волновода располагается полупрозрачное зеркало. Очевидно, что наименьшими потерями должны обладать волны, с одинаковыми распределениями амплитуды в соседних ячейках транспаранта, но находящимися в противофазе. Кроме того, после полного обхода резонатора распределение амплитуды должно воспроизводиться, т.е. должен иметь место эффект Тальбота в коаксиальном волноводе. При реализуемости указанных предположений именно когерентная по всему поперечному сечению волна обладает наибольшей добротностью. Длина волновода должна равняться Тальботовской длине, определяемой периодом транспаранта. Анализ показал, что эффект Тальбота в коаксиальных волноводах действительно существует. Получено выражение для Тальботовской длины в такой системе. Расчеты продемонстрировали особенность угловых характеристик излучения, получаемого в таких системах. Показано, что степень заполнения излучением элементов периодической маски существенно сказывается не только на энергетике, но и на направленности излучения.

В результате проделанной работы сделан вывод о том, что непосредственная реализация указанной схемы резонатора для коаксиальных волноводов, представляющих практический интерес, едва ли приведет к удовлетворительным результатам. Предложены варианты модификации рассмотренной схемы, которые, по-видимому, позволят преодолеть выявленные препятствия, мешающие реализации резонатора подобного типа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ АИГ-ЛАЗЕРАМИ

Матюшин И.В.

СПбГТУ, г.С-Петербург

Сущность процесса лазерной маркировки состоит в изменении поверхности маркируемого материала под действием лазерного излучения. При воздействии на металлы и неметаллы лазерного излучения происходит нагрев до критической температуры, инициируются химические реакции, происходят структурные изменения, плавление и испарение, что приводит в общем случае к изменению в месте воздействия лазерного излучения коэффициента отражения видимого света R_M по сравнению с коэффициентом отражения R_Φ необработанного фона (поверхности материала). Контрастность маркировки K_M пропорциональна отношению $(R_M - R_\Phi/R_M)$. Величину R_M логично связывать с комплексом изменений, произошедших с поверхностью "промаркированного" материала. Конкретное значение R_M , очевидно, является сложной функцией $R_M = f(m, t, T, dT/dt)$, где аргументами являются свойства материала M , время воздействия t и температура T , определяющие типы и интенсивность проходящих изменений.

Технологическими параметрами для лазерного технологического комплекса являются: средняя мощность лазерного излучения P_{CP} (Вт); импульсная мощность лазерного излучения $P_{ИМП}$ (Вт); длительность импульса $t_{И}$ (мкс); частота повторения импульсов f (кГц); скорость перемещения луча по поверхности изделия (скорость маркировки) V (мм/с); диаметр отпечатка на изделии $d_{П}$ (мм); ток лампы накачки $I_{Л}$ (А).

Установлено, что величина пиковой мощности на практике является определяющей для проведения процесса маркировки того или иного типа, а величина P_{CP} задает возможную скорость перемещения луча V при данном значении диаметра отпечатка $d_{П}$. Практический опыт показывает, что оптимальные режимы маркировки в большинстве случаев организуются в режиме "перекрывающихся импульсов", что достигается определенным соотношением частоты следования импульсов излучения и скорости маркировки. Предполагается, что физико-химическим механизмом, объясняющим последнее, могут быть протекающие в течение одного импульса процессы изменения поглощательной способности, связанные с активацией химических процессов, которые могут при накладывании импульсов друг на друга привести к возникновению положительных обратных связей, если продукты этих процессов отличаются оптическими свойствами от исходного вещества.

Для пластических материалов при выборе режима маркировки крайне важно "фиксировать" ту стадию фотодеструкции, термической и термоокислительной деструкции, диффузионных процессов, переходящих на макроуровне в чисто механическое разрушение (плавление, испарение), которая характеризуется оптимальным значением коэффициента отражения модифицированного материала R_M , что требует более тонкого, чем для металлов, регулирования времени нагрева и нахождения материала при заданной температуре, что возможно только при использовании импульсного модулированного излучения лазера, организованного во времени в виде серии импульсов заданной формы с определенной длительностью, частотой следования и пиковой мощностью, что позволяет, устанавливая необходимые скорости нагрева и

пребывания материала при высоких температурах, выбирать оптимальные режимы маркировки.

Предложено использовать параметр J_M ("жесткость" режима маркировки), показывающий количество импульсов излучения, приходящихся на длину перемещения луча, равную ширине отпечатка, который будет связан с требуемой импульсной мощностью $P_{\text{имп}}$. Оформление поля оптимальных режимов в координатах $P_{\text{имп}} - J_M$, основанное на субъективном восприятии результатов маркировки, позволяет определять области необходимых технологических параметров.

Представленные данные по механизмам образования окрашенного слоя под воздействием лазерного излучения Nd- АИГ лазера для основных типов пластмасс не учитывают на данном этапе наличия в пластмассе наполнителя, а являются ориентиром для практического определения технологических параметров маркировки опытным путем.

По результатам исследований делается вывод, что наиболее надежные результаты по цветной маркировке пластмасс могут быть достигнуты с помощью введения в пластмассу на стадии изготовления комбинации термо- или фото-активного красителя с термо- и фотостойким красителем .

ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК НИТРИДА ТИТАНА ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Норман Е.А.

СПбГТУ, г.С.-Петербург

В области исследований взаимодействия лазерного излучения с веществом длительное время приоритетными оказывались работы, требующие экстремальных значений параметров излучения. Однако, как оказалось позже, использование средних и малых значений параметров привело к значительному расширению области применения лазеров. Особое внимание привлекает лазерная химия, которая позволяет использовать некоторые физико-химические особенности процессов и, как следствие, создавать и осуществлять новые нетрадиционные способы и технологии получения материалов.

В работе исследуется процесс осаждения пленок нитрида титана из газовой фазы в системе $TiCl_4-N_2-H_2$ под воздействием лазерного излучения при атмосферном давлении. Традиционно известные способы нанесения слоев и покрытий из нитрида титана требуют высокой температуры ($>1000^\circ C$) или вакуума и не позволяют проводить локального осаждения.

Источником лазерного излучения взят твердотельный лазер ЛТН-103 с длиной волны 1,06 мкм. Установлена необходимость снижения мощности лазера, найден оптимальный режим работы, обеспечивающий минимальный разброс значений мощности в интервале 15-30 Вт.

Исходными реагентами являются: жидкий тетрахлорид титана (марки х.ч.), предварительно нагреваемый до температуры $50^\circ C$ с целью получения насыщенных паров, азот и водород марки о.с.ч.

Сконструирована и изготовлена оригинальная установка, в состав которой входят следующие блоки: лазер; специальный испаритель для получения насыщенных паров тетрахлорида титана; газораспределительная система для контролируемого подвода реагентов в зону реакции, обеспечивающая отдельную подачу тетрахлорида титана, азота и водорода; реактор; система отвода продуктов реакции. Реактор выполнен из кварцевого стекла в виде разборного цилиндра, состоящего из двух частей. В верхней части реактора расположено входное окно из полированного кварцевого стекла, пропускающее излучение с длиной волны 1,06 мкм. Ввод и вывод реагентов осуществляется в верхней части реактора на расстоянии 40 мм от входного окна. В собранном виде реактора предметный столик расположен на расстоянии 55 мм от входного окна. Перед каждым экспериментом на предметный столик устанавливается подложка, в течение 10-12 минут вся система продувается азотом для удаления следов влаги и кислорода из реакционной зоны. В качестве подложек использовались керамические пластины.

Химические процессы, стимулированные лазерным излучением, протекают в качественно новых колебательно-неравновесных условиях. Активными становятся те группы атомов, которые при обычном нагреве не вступают во взаимодействие. В процессе осаждения пленки под воздействием лазерного излучения температура подложки достигает порядка $800^\circ C$. На керамической пластинке образуется пленка, в центре которой расположено серое пятно, равное по размеру диаметру лазерного пучка, вокруг которого коаксиально распределены разноцветные кольца. Кольца

имеют желтовато-золотистый цвет разный по интенсивности. При изменении потоков реагентов иногда цвет распределяется от сине-фиолетового через красный к бордо. Известно, что цвет нитрида титана сильно зависит от соотношения атомов титана и азота в его молекуле. Если соотношение близко к единице, то пленка имеет характерный золотистый цвет, если соотношение отличается от стехиометрического, то резко меняется и цвет. В частности, образующееся серое пятно в центре пленки свидетельствует о дефиците атомов азота в составе молекулы нитрида титана. По мере удаления от центра, из-за изменения температуры на поверхности подложки состав молекул нитрида титана начинает меняться, что и наблюдается в виде разноцветных колец.

НОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАРКИРОВКИ, КЛЕЙМЕНИЯ И СВЕРЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Горный С.Г., Сухов Ю.Т.*

ЦЛТ, г. С.-Петербург,
* ЦНИИ РТК, г. С.-Петербург

Центр лазерной технологии (ЦЛТ) и Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК) разработали ряд лазерных технологических установок (ЛТУ) и начали в ЦЛТ серийное и опытное производство этих установок.

В 1995 году разработана ЛТУ "Кобра-201" на базе CO₂ лазера для маркировки и гравировки неметаллических материалов. В установке применена оригинальная схема оптического телескопа.

Суть технологии лазерной маркировки и гравировки: высокоскоростное лазерное нанесение текстовой и графической информации (заводские номера, товарные знаки, штриховые коды и пр.) на различные детали с высокой точностью и разрешением путем воздействия модулированного сканирующего лазерного излучения на поверхность обрабатываемого изделия. При этом в зоне обработки происходит местное термовлияние и переплавление материала изделия (маркировка) или частичное испарение материала изделия (гравировка), что и приводит к появлению требуемого изображения.

Состав комплекса: CO₂ лазер мощностью 10 Вт, гальво-система управления лучом, электронная схема управления системы, источник питания, комплекс деталей корпуса, рабочий стол, управляющий компьютер для подготовки и исполнения программ, программное обеспечение.

Основные технические характеристики: размер зоны обработки - 80x80 мм (50x50 мм); размер знаков - от 1,5 до 80 мм; скорость обработки - от 1 до 1000 мм/с; ширина линии с автоматическим заполнением - от 0,2 до 10 мм; маркируемые материалы - дерево, оргстекло, кожа, стекло и др.

Назначение (возможные области применения): предназначен для лазерной маркировки и гравировки материалов (пластиков, дерева, полупроводников), изделий (микросхем, конденсаторов, клавиатур и пр.) и товаров народного потребления в машиностроении, электронной промышленности, автомобилестроении, медицинской промышленности и пр. Изображение наносится в виде штриховых и точечных рисунков, символов, линий, букв, цифр и пр.

В 1996 году разработана ЛТУ "Дельта-201" на базе Nd-YAG лазера для клеймения изделий из драгоценных металлов. В установке применена оригинальная оптическая схема получения проекционного изображения через маску.

Суть технологии лазерного клеймения: лазерное нанесение (клеймение) изображений пробирных клейм и именных на изделия из драгоценных металлов путем воздействия импульсного лазерного излучения длиной волны 1,064 мкм, спроецированного через маску трафаретного типа, на поверхность обрабатываемого изделия. При этом в зоне обработки происходит местное переплавление и частичное испарение материала изделия, что и приводит к появлению требуемого изображения.

Состав комплекса: твердотельный лазер с пассивным затвором, источник питания импульсной лампы, устройство охлаждения, оптико-механическое устройство

формирования и засветки маски, узел крепления масок, фокусирующий объектив, система наводки излучения на изделие, корпус.

Основные технические характеристики: размер изображения - максимальный 1.0 x 4.0 мм, минимальный 0.5 x 0.5 мм; глубина клеймения - не менее 0.01 мм; разрешающая способность - 15 лин./мм; производительность 12 клеймений/мин.; обрабатываемые материалы - золото, серебро, нержавеющая сталь и др. металлы.

Назначение (возможные области применения): предназначен для лазерного клеймения изделий из драгоценных металлов в ювелирной промышленности, инструмента в медицинской промышленности и машиностроении, радиокомпонентов (конденсаторов, резисторов и пр.).

ЛТУ "Кобра-201" и "Дельта-201" выпускаются серийно в ЦЛТ.

В 1997 году разработаны и выпущено два опытных образца ЛТУ "Бетамарк-2000" на базе Nd-YAG лазера для маркировки и гравировки материалов. Эта установка заменит выпускаемую нами много лет ЛТУ "Альфа-201". В установке применена оригинальная оптическая схема, сканаторы фирмы «General Scanning » с разработанными нами системой управления сканаторами и программным обеспечением, что позволило значительно повысить точность и разрешение .

Суть технологии лазерной маркировки и гравировки описана выше.

Состав комплекса: твердотельный лазер мощностью 16 Вт (TEM₀₀), гальво-система управления лучом, электронная схема управления системы, источник питания, комплекс деталей корпуса, рабочий стол, управляющий компьютер для подготовки и исполнения программ, программное обеспечение.

Основные технические характеристики: размер зоны обработки: 100 x 100 мм (50 x 50) мм; скорость обработки: от 1 до 2500 мм/с; программное разрешение: 0,0025 мм ; воспроизводимость 0,05 мм (0,025) мм; размер знаков: от 1 до 100 мм; ширина линии с автоматическим заполнением: от 0,05 до 10 мм; обрабатываемые материалы: сталь, алюминий, титан, бронза, резина, полупроводники и пр.

Назначение (возможные области применения): предназначен для лазерной маркировки и гравировки материалов (металлов, пластиков, полупроводников), изделий и товаров народного потребления в машиностроении, электронной промышленности, автомобилестроении, медицинской промышленности и пр.

ЛТУ " Бетамарк-201 " планируется выпускать серийно в ЦЛТ с 1998 года.

В 1997 году разработан стендовый образец ЛТУ " LD-600" на базе Nd-YAG лазера для скоростного сверления (прошивки) отверстий сложной формы пачками импульсов лазерного излучения. В установке применена оригинальная оптическая схема получения проекционного изображения через маску.

Суть технологии: сверление (прошивка) в изделиях из металлов и неметаллов отверстий сложной формы, определяемой диафрагмированием излучения, за счет сублимации материала под воздействием повторяющихся пачек импульсов излучения YAG-Nd с длиной волны 1.064 мкм. Использование оптимального соотношения между энергией пачки импульсов, числом импульсов в ней и частотой повторения пачек импульсов позволяет значительно снизить эффективную энергию разрушения материала мишени и повысить скорость прошивки.

Состав комплекса: твердотельный лазер с пассивным затвором, источник питания импульсной лампы, устройство охлаждения, оптико-механическое устройство формирования и засветки маски, узел крепления масок, фокусирующий объектив, система наводки излучения на изделие, корпус.

Основные проектируемые характеристики: размер отверстий: максимальный 4,0 x 4,0 мм , минимальный 0,3 x 0,3 мм; глубина: до 3 мм, скорость обработки: 0,3...1,5 мм/мин; оптимальные соотношения диаметр/глубина отверстия: 1/5...1/10; конфигурация отверстия - любая, например: круг, квадрат, треугольник и т.п.;

обрабатываемые материалы: сталь, алюминий, титан, бронза, искусственный алмаз, карбид бора, резина, полупроводники и пр.

Возможные коммерческие применения: лазерное сверление изделий из драгоценных металлов и камней в ювелирной промышленности, инструмента в медицинской промышленности и машиностроении, твердых и сверхтвердых сплавов.

Разработаны технологические процессы лазерной маркировки, гравировки, клеймения и сверления различных материалов с использованием описанных выше ЛТУ.

ПРОШИВКА ОТВЕРСТИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАЧЕК ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Горный С.Г., Григорьев А.М., Лопота В.А.*, Сухов Ю.Т.*, Туричин Г.А.

ЦЛТ, г. С.-Петербург
*ЦНИИ РТК, г. С. –Петербург

Технологии лазерной прошивки отверстий широко используется в промышленности, однако совместить высокую эффективность процесса с высоким качеством получающегося отверстия зачастую бывает невозможно. При высокой ($>10^7$ Вт/см²) плотности мощности падающего излучения процесс сверления идет в испарительном режиме, характеризующимся высоким качеством отверстия, но затраты энергии на сверление при этом велики, т.к. они определяются удельной энтальпией испарения материала мишени. При снижении плотности мощности часть материала удаляется в виде расплава, что снижает удельную энергию разрушения и повышает эффективность процесса, но качество отверстия ухудшается, поскольку давление отдачи в этом случае неспособно удалить весь расплав. Для получения оптимального режима сверления с точки зрения эффективности и качества можно использовать пачки лазерных импульсов высокой интенсивности, когда средний за пачку уровень интенсивности излучения невелик, что снижает удельную энергию разрушения, а пиковая интенсивность достаточно велика, чтобы импульс давления отдачи при испарении привел к полному удалению расплава из зоны обработки.

Рассмотрим особенности процессов тепломассопереноса при воздействии пачек длительностью 0.3...0.4 мс из 3-20 лазерных импульсов длительностью $\sim 10^{-8}$ с при энергии в пачке порядка 0.1...1 Дж на металл подробнее. При длине волны лазерного излучения 1.06 мкм такое излучение можно сфокусировать до плотности мощности 10^8 - 10^9 Вт/см². После начала первого импульса пачки через некоторое время t^* температура поверхности достигает равновесной температуры испарения и после этого не растет, т.к. вся вновь поступающая энергия расходуется на испарение. Значение t^* определяется из решения тепловой задачи о нагреве материала потоком излучения с интенсивностью q : $t^* = \left(\frac{2\lambda T^*}{q} \sqrt{\frac{\pi}{\chi}} \right)^2$, где λ , χ - соответственно коэффициенты теплопроводности и температуропроводности. Оценка для железа дает: $t^* \sim 10^{-10}$ с, т.е. практически на протяжении всей длительности импульса температура поверхности

мишени постоянна и равна T^* . Величина T^* определяется из одновременного выполнения условий баланса энергии и массы при испарении, и при $q \sim 10^8 \dots 10^9 \text{ Вт/см}^2$ T^* в два - три раза превышает температуру кипения. На облучаемую поверхность при этом действует давление отдачи $P = \frac{q}{L} c$, где c - местная скорость звука, L - удельная энтальпия испарения. От поверхности в глубину образца движется фронт плавления, положение которого можно приближенно определить как: $h \sim (\chi t)^{1/2}$. К концу первого импульса он успевает пройти не более 1 мкм (для железа), и толщина жидкой прослойки столь мала, что вытеснить расплав давлением паров невозможно. Условием вытеснения в данном случае является превышение механической мощности давления отдачи над мощностью, развиваемой вязкими силами при вытеснении расплава, либо, в зависимости от режима обработки, над мощностью сил инерции. Решение гидродинамической задачи дает для этого следующее условие: $h > \sqrt{\frac{v \rho L a^2}{8 q c t_0}}$, где t_0 - длительность импульса, a - радиус луча на поверхности изделия, и в интересующем нас диапазоне мощностей для железа имеем $h > 20$ мкм. Если за время действия пачки импульсов фронт плавления успевает достичь такой глубины, то испарительный механизм разрушения сменяется вытеснением расплава, и скорость процесса возрастает в несколько раз. Действительно, при испарительном сверлении углубление за время действия одной пачки импульсов составляет: $x \sim q t_0 / \rho L$, тогда как предельное значение этой величины при вытеснении расплава составляет: $x \sim (\chi t_p)^{1/2}$, где t_p - длительность пачки импульсов.

Проведенные эксперименты подтверждают приведенный теоретический анализ процесса прошивки отверстий пачками импульсов лазерного излучения. Для реализации этого процесса разработана лазерная технологическая установка.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛОЙНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ОЛИГОАКРИЛАТОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УФ- И ИК- ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ФОРМ

Смирнов Р.Ф. , Лезовская О.Ю., Паршиков Р.А., Флеров Д.В.

СПбГТУ, г.С-Петербург

Вопросы, касающиеся разработки новых технологий с целью создания объемных форм (лазерная стереолитография) находятся в центре внимания ведущих зарубежных фирм, занимающихся выпуском и внедрением лазерных установок для стереолитографии. Одна из задач в рамках таких технологий состоит в создании композиций, пригодных для полимеризации под воздействием излучения лазера, как УФ- так и ИК-диапазона. В случае ИК-излучения следует отметить неустойчивость химических процессов, протекающих под воздействием лазерного излучения, поскольку процесс полимеризации в открытых системах происходит на грани протекания термоокислительных процессов и находится в довольно узком температурном интервале. Теплофизические и кинетические параметры полимеризационного процесса при этом во многом зависят от состава полимеризуемой под влиянием лазерного излучения композиции. Вопросы математического моделирования процесса полимеризации различных соединений также являются предметом постоянного изучения. Поэтому тема данной работы представляется довольно актуальной, учитывая к тому же отсутствие отечественных установок и технологий для полимеризации под воздействием CO_2 -лазеров.

В представленной работе были проведены исследования полимеризации различных акрилатных соединений с помощью УФ- и ИК-лазерного излучения с целью создания объемных форм и был разработан ряд композиций на основе эпоксиакрилатной смолы ЭАС-20 (ЭАС-22) с молекулярной массой 400-600. Композиции в своем составе содержат инициаторы полимеризации, активные разбавители, растворители, различные наполнители и красители. Исследования кинетики полимеризации разработанных композиций под влиянием УФ- и ИК-излучения лазера показали, что процесс полимеризации проходит с наиболее приемлемыми скоростями сканирования лазерного луча при применении для разбавления композиции органических растворителей с низкой теплоемкостью. Найдено, что процесс полимеризации существенно зависит от параметров лазерного излучения, концентрации инициатора и вязкостных характеристик среды. Процесс протекает в микрогетерогенном объеме в условиях равновесия между степенью полимеризации и степенью испарения реакционной среды, причем процесс полимеризации существенно зависит от температуры в полимеризуемом микрообъеме. Подсчет температуры для ИК-излучения лазера в зависимости от теплофизических характеристик среды показал, что в данном случае она может находиться в довольно широких пределах (200 - 600° С) и поэтому процесс полимеризации может быть легко сдвинут в сторону протекания деструктивных процессов при изменении параметров лазерного излучения. В ходе исследования было найдено, что скорость сканирования при полимеризации может быть доведена до 50-250 мм/с (в известных литературных источниках для аналогичных составов скорости сканирования составляют 20-50 мм/с)

Проведено исследование кинетики процессов полимеризации олигоэфиракрилатов под влиянием УФ-лазерного излучения при формировании трехмерных объектов.

Предложена математическая модель процесса фотоиницированной полимеризации олигоакрилатов с помощью УФ-лазерного излучения, которая позволяет рассчитывать зависимость высоты (толщины) отверждаемого слоя от параметров излучения композиции .

ГАЗОЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ ЛАЗЕРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ НА БАЗЕ CO₂ ЛАЗЕРОВ МОЩНОСТЬЮ 1...3 КВТ

Сухов Ю.Т.

ЦНИИ РТК, С.-Петербург

Теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса газолазерной резки (ГЛР) металлов (в основном, низкоуглеродистой стали) CO₂ лазерами мощностью до 1 кВт, особенно, в непрерывном режиме генерации излучения лазера проведены достаточно широко. Процесс ГЛР CO₂ лазерами мощностью 1...3 кВт изучен недостаточно из-за высокой стоимости таких лазеров. Проведенные эксперименты в этом диапазоне мощностей показали, что необходимо внести существенные изменения и в теоретические разработки ГЛР. Процесс ГЛР в импульсно-периодическом режиме излучения CO₂ лазера, особенно для малых скважностей, во всех диапазонах мощностей изучен намного слабее. Влияние параметров технологического комплекса на технологический процесс ГЛР тоже изучены недостаточно. Поэтому были проведены комплексные исследования технологического процесса ГЛР металлов и сплавов технологическими комплексами на базе CO₂ лазеров мощностью 1 - 3 кВт.

Представлены результаты экспериментального моделирования технологического процесса газолазерной резки низкоуглеродистой стали (Вст3-ПС), нержавеющей стали (12Х18Н10Т), титанового сплава (ВТ1-0), алюминиевого сплава (АМГ-6), медного сплава (М1) при использовании активных и инертных газов в непрерывном и импульсно-периодическом режимах генерации лазера. Резка металлов и сплавов проводилась на лазерных технологических комплексах на базе CO₂ лазеров ЕFA-53, RS-2500, Hebr-1А, Е-7000 с использованием резательных головок с коническими суживающимися соплами. Показаны параметры ГЛР при мощностях лазера 200...3000 Вт.

Описана экспериментально-теоретическая модель технологического процесса ГЛР металлов и сплавов. Теоретическая часть модели основана на совместном решении уравнений сохранения энергии, импульса, массы и учитывает оптические, тепловые, газо- и гидродинамические подпроцессы при взаимодействии лазерного излучения с металлами.

Экспериментально определено количество мощности излучения, прошедшей через щель мимо передней стенки реза, и не учитываемой обычно в теоретических моделях, и введен соответствующий коэффициент учета потерь этой мощности.

Экспериментально оценен коэффициент диффузии кислорода при ГЛР с использованием активных газов. Его величина в условиях ГЛР существенно отличается от обычно используемой при расчетах величины коэффициента диффузии для комнатной температуры.

Экспериментально определены также следующие величины: коэффициент поглощения лазерного излучения металлами, диаметр луча лазера, температура нагрева передней стенки реза в оптимальном режиме, средняя температура нагрева передней стенки реза, скорость течения жидкой пленки расплава, число Рейнольдса, характеризующее характер течения в расплавленном слое металла под действием режущего газа.

Показано, что для получения качественных резов температура передней стенки реза должна быть значительно меньше температуры кипения металла. При достижении

температуры кипения на передней стенке реза нарушается оптимальный процесс ГЛР вследствие отсутствия достаточного количества расплава на передней стенке, а также из-за оптического пробоя паров.

Температура, до которой нагревается поверхность передней стенки реза и время образования расплавленного слоя оптимальной толщины определяется эффективной интенсивностью. Для различных металлов оценена максимальная интенсивность на передней стенке реза, при которой достигается температура кипения. Получено, что чем меньше давление режущего газа, тем меньше должна быть максимальная интенсивность.

Эффективная интенсивность источника излучения на передней стенке реза должна быть меньше максимальной и при ГЛР в импульсно-периодическом режиме генерации лазера. Для импульсно-периодического режима для различных металлов оценена минимальная длительность импульса, необходимая для образования расплавленного слоя достаточной для выноса толщины. Получено, что чем меньше давление газа, тем больше минимальная длительность импульса.

Полученные оценки и проведенные исследования позволили заключить при каких эффективных интенсивностях и длительностях импульсов излучения для всех режимов генерации процесс ГЛР не зависит от временных параметров излучения и определяется только средней мощностью излучения и скважностью. Для этого диапазона режимов описана экспериментально-теоретическая модель технологического процесса ГЛР металлов в импульсно-периодическом режиме генерации лазера.

Исследование влияния параметров технологического комплекса на процесс ГЛР и результаты приведенных выше исследований позволили сформулировать основные требования к энергетическим, временным и технологическим параметрам лазерных технологических комплексов на базе CO_2 лазеров для ГЛР металлов.

Проведено компьютерное моделирование технологического процесса ГЛР металлов и сплавов в различных режимах генерации лазера. Показано хорошее совпадение результатов экспериментального и компьютерного моделирования.

