

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
БЕЛАРУСЬ**
**Гомельский государственный
университет**
имени Ф. Скорины

Кафедра радиофизики и электроники

**Лазерная технология обработки
материалов**

Лабораторный практикум

Гомель 2001

Авторы-составители: В.Н. Мышковец
А.В. Максименко

Рецензенты: к.т.н. Н.Н. Федосенко
к.ф.-м.н. В.Ф. Шолох

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
Гомельского госуниверситета имени Ф. Скорины

Лабораторный практикум «Лазерная технология обработки материалов» включает в себя 9 лабораторных работ по разделам курса: «Технологические лазеры для обработки материалов», «Лазерная сварка металлов», «Лазерная резка металлических и неметаллических материалов», «Термическое упрочнение поверхностей лазерным излучением», «Лазерная прошивка отверстий».

Предназначено для студентов физического факультета специальности «Физика».

© Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины,
2001

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение вредных и опасных производственных факторов, техники безопасности при эксплуатации лазеров и лазерного оборудования и определение предельно допустимых уровней облучения глаза лазерным излучением.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: твердотельный лазер на алюмо-иттриевом гранате, юстировочный He-Ne лазер, измеритель энергии ИКТ-1Н, измерительная линейка.

Теоретическое введение.

При эксплуатации лазеров и лазерных установок персонал может подвергаться воздействию большого числа опасных и вредных производственных факторов. Степень их воздействия зависит от пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения, условий эксплуатации лазерных установок и их конструктивных особенностей. При этом можно выделить два типа опасных и вредных производственных факторов. К первому типу относятся факторы, воздействующие в основном на отдельные органы, ко второму— на весь организм. Первый тип факторов включает лазерное излучение, аэродисперсные системы, вредные химические вещества и шум. Ко второму типу факторов относят вибрацию, электромагнитные поля, повышенное напряжение, ионизирующее излучение, микроклиматические условия. Подробнее рассмотрим опасные и вредные производственные факторы, имеющие место при эксплуатации лазеров.

Лазерное излучение. Основную опасность лазерное излучение представляет при воздействии на орган зрения. Повреждение глаз может произойти в результате действия как прямого, так

и отраженного излучения. В производственных условиях облучение прямым лазерным излучением возможно лишь при грубом нарушении правил техники безопасности.

Влияния этого фактора опасности определяется плотностью энергии (мощности) излучения лазера, длиной волны, условиями его использования и режимом работы (импульсный, непрерывный). Можно отметить, что лазерное излучение является определяющим при оценке степени безопасности технологических процессов при использовании лазерных установок.

Аэрозоли. Образование аэродисперсных систем связано с взаимодействием лазерного излучения с мишенями. Аэрозоли могут ингаляционным путем поступать в органы дыхания, а также воздействовать на кожные покровы. В последнем случае опасность представляют аэрозольные частицы, имеющие высокую температуру, которые могут приводить к ожогу кожи. Интенсивность образования аэродисперсных систем обусловлена плотностью энергии (мощности) лазерного излучения, свойствами мишени, взаимодействующей с излучением, и режимом работы лазера (импульсный, непрерывный).

Вредные химические вещества. Данная категория опасных и вредных производственных факторов обусловлена образованием токсических веществ и газов при взаимодействии лазерного излучения с различными средами, выделением вредных веществ из отдельных сборочных единиц лазера при его работе и радиолизом воздуха. Выраженность этих факторов зависит от тех же параметров, что и в первых двух случаях. Следует отметить, что возникновение вышеуказанных трех категорий опасных и вредных производственных факторов связано непосредственно с лазерным излучением. Химические токсические вещества могут воздействовать как на органы дыхания, так и на кожу.

Шум. Он возникает при работе лазерных установок, имеет различный характер и может быть стабильным при работе лазеров в непрерывном режиме, а также от сборочных единиц и агрегатов, комплектующих установку, и импульсным — при эксплуатации твердотельных лазеров. В основном шум воздействует на органы слуха.

Вибрация. Возникновение вибрации, как правило, неразрывно связано с шумом. В процессе эксплуатации лазерных установок вибрация возникает в результате работы отдельных сборочных единиц. Она воздействует на весь организм.

Электромагнитные поля. Для определенных лазерных установок неблагоприятными факторами могут явиться электромагнитные поля высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот, воздействующие на организм в целом.

Повышенное напряжение. Источники питания током лазеров являются в основном обычными электротехническими устройствами. Поэтому мероприятия, обеспечивающие безопасность при наладке и обслуживании этих устройств, имеют неспецифический характер.

Ионизирующее излучение. Высокотемпературная плазма, образующаяся при взаимодействии мощного лазерного излучения с материалом мишени, может явиться источником нейтронного и гамма-излучения. Кроме того, не исключена возможность появления мягкого рентгеновского излучения при работе электронной аппаратуры.

Микроклимат. Микроклиматические условия при эксплуатации лазерных установок определяются рядом параметров: скоростью движения воздуха в рабочих помещениях, влажностью воздуха, температурой в помещении, фоном, обусловленным работой сборочных единиц и агрегатов лазерных установок.

В зависимости от класса лазерных установок степень выраженности рассмотренных опасных и вредных производственных факторов различна.

С момента появления первых лазеров внимание исследователей было обращено на способность генерируемого лазерами излучения оказывать неблагоприятное воздействие на организм человека или отдельные его органы, и в первую очередь на глаза и кожу.

Патологические эффекты воздействия лазерного излучения на глаза. Сравнительно легкая уязвимость роговицы и хрусталика глаза при воздействии электромагнитных излучений

самых различных длин волн, а также способность оптической системы глаза увеличивать плотность энергии (мощности) излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазона на глазном дне на несколько порядков по отношению к роговице выделяет его в наиболее уязвимый орган.

Взаимодействуя с элементами оптической системы лазерное излучение может вызвать их повреждение. Степень повреждения глаза главным образом зависит от таких физических параметров, как время облучения, плотность потока энергии, длина волны и вид излучения (импульсное или непрерывное), а также индивидуальных особенностей глаза. При рассмотрении воздействия лазерного излучения на орган зрения необходимо отдельно разбирать действие излучения с длинами волн в интервале 0,4—1,4 мкм и длинами волн вне этого интервала. Для электромагнитного излучения с длинами волн короче 0,4 мкм и длиннее 1,4 мкм оптические среды глаза являются непрозрачными, и поэтому фокусирующее действие не имеет места.

Воздействие ультрафиолетового излучения на орган зрения в основном приводит к поражению роговицы (кератит). Наибольшим фотокератическим действием обладает излучение с длиной волны 0,288 мкм. Излучение с длиной волны короче 0,32 мкм почти полностью поглощается в роговице и водянистой влаге передней камеры глаза, а с длинами волн 0,32—0,39 мкм — в хрусталике. За счет высокого коэффициента поглощения излучения в роговице и водянистой влаге передней камеры даже на длине волны 0,32 мкм минимальная величина энергии, необходимая для возникновения нежелательных химических реакций в хрусталике, в 2—3 раза больше, чем соответствующая энергия для роговицы. Поэтому помутнение хрусталика (катаракта) под влиянием ультрафиолетового излучения практически никогда не наблюдается. Поверхностные ожоги роговицы лазерным излучением с длиной волны в пределах ультрафиолетовой области спектра устраняются в процессе самозаживания.

Для лазерного излучения с длиной волны 0,4—1,4 мкм критическим элементом органа зрения является сетчатка (Несмотря на то, что и здесь (при больших мощностях) может происходить повреждение переднего отдела глаза, основное значение приобретает повреждение сетчатки, которое начинает происходить при уровнях энергии еще не вызывающих повреждения прозрачных сред глаза). Она представляет собой функционально наиболее значимый элемент глаза, обладает высокой чувствительностью к электромагнитным волнам видимой области спектра и характеризуется большим коэффициентом поглощения электромагнитных волн видимой, инфракрасной и ближней ультрафиолетовой областей.

Повреждение глаза может изменяться от слабых ожогов сетчатки, сопровождающихся незначительными или полностью отсутствующими изменениями зрительной функции, до серьезных повреждений, приводящих к ухудшению зрения и даже к полной его потере.

Длительное облучение сетчатки в видимом диапазоне на уровнях, не намного меньших порога ожога, может вызывать необратимые изменения в ней. Длительное облучение глаза в диапазоне ближнего инфракрасного излучения может привести к помутнению хрусталика.

Повреждение сетчатки обязательно сопровождается нарушением функции зрения. Клетки сетчатки, как и клетки центральной нервной системы, после повреждения не восстанавливаются.

Повреждения сетчатки под влиянием лазерного излучения можно разделить на две группы. К первой относятся временные нарушения зрительной функции глаза без видимых изменений глазного дна. Примером такого повреждения является ослепление от яркости световой вспышки. Ко второй относятся повреждения, сопровождающиеся разрушением сетчатки, проявляющиеся в виде термического повреждения ожогового или «взрывного» характера.

Ослепление от яркости световой вспышки является самым слабым проявлением поражающего действия лазерного излучения.

Оно носит обратимый характер и выражается в возникновении «слепого пятна» в поле зрения. Результатом такого ослепления является полный распад зрительного пигмента в фоторецепторах сетчатки под действием видимого света большой яркости. Ослепление наступает при наблюдении источника яркого света, который создает на роговице плотность излучения порядка 150 Вт/см^2 . Восстановление зрительного пигмента в фоторецепторах сетчатки иногда затягивается на несколько минут.

Воздействие на глаз сверхпороговых интенсивностей излучения вызывает тепловой ожог глазного дна с необратимым повреждением сетчатки. Минимальное повреждение проявляется мельчайшим, видимым в офтальмоскоп изменением сетчатки, представляющим собой небольшое белое пятно из свернувшихся белков с областью кровоизлияния в центре. Поврежденный участок окружен зоной отека. Спустя несколько дней на месте повреждения появляется рубец из соединительной ткани, не способный нести функцию зрительного восприятия.

Импульсное лазерное излучение представляет большую опасность, чем непрерывное, так как в этом случае повреждение глазного дна вызывается комбинированным действием — термическим и механическим. Механическое действие излучения проявляется в виде «взрыва» зерен меланина, причем сила «взрыва» такова, что зерна пигмента выбрасываются в стекловидное тело.

Облучение менее интенсивными уровнями может вызывать начальные изменения, при которых восстановление зрительной функции возможно, однако считается, что повторное облучение при таких же, достаточно низких энергетических уровнях может привести к невосстанавливающимся повреждениям.

При воздействии лазерного излучения на сетчатку особенно опасны повреждения центральной ямки и желтого пятна — наиболее важных функциональных областей глаза. Повреждение этих областей сопровождается почти полной потерей зрения. Чем больше угол между зрительной осью и направлением падения лазерного луча, тем меньше степень нарушения функции зрения.

Непроизвольные движения глазного яблока приводят к тому, что отдельные участки сетчатки изменяют свое положение относительно падающего излучения много раз в секунду. Поэтому непрерывное и импульсно-периодическое излучение вызывают повреждения сетчатки в области, большей, чем площадь сфокусированного на ней изображения, даже в том случае, если во время облучения пучок не отклоняется от прямой линии видения.

В стекловидном теле и водянистой влаге передней камеры задерживается около 5% проходящей через них энергии электромагнитных волн видимой области спектра.

Поглощение энергии излучения различными структурами глаза растет с увеличением длины волны излучения в ближней инфракрасной области. Излучения с длинами волн более 1,4 мкм практически полностью поглощаются в стекловидном теле и водянистой влаге передней камеры. При умеренных повреждениях эти среды глаза способны самовосстанавливаться.

Небольшие ожоги радужной оболочки могут закончиться самозаживлением и не вызывают постоянных нарушений зрения. Тяжелые ожоги приводят к образованию рубцовой ткани, деформации радужной оболочки с потерей остроты зрения. Степень повреждения радужной оболочки лазерным излучением в значительной мере зависит от ее окраски. Например, зеленые и голубые глаза, характеризуются большим повреждением, а карие - небольшим.

Лазерное излучение средней инфракрасной области спектра может причинить тяжелое повреждение роговице, сопровождающееся денатурацией белков и полной потерей прозрачности (образованием бельма). Главный механизм воздействия инфракрасного излучения - тепловой. Степень теплового повреждения роговицы зависит от поглощенной дозы излучения, причем травмируется не сосудистая оболочка, расположенная глубже, а тонкий эпителиальный слой. Если доза излучения велика, то может произойти полное разрушение защитного эпителия с одновременным помутнением радужной оболочки из-за коагуляции белка и хрусталика, развивается катаракта.

Хрусталик повреждается около обожженных участков радужной оболочки. Это свидетельствует о том, что изменения в хрусталике носят вторичный характер, т. е. инфракрасное излучение поглощается пигментным эпителием радужной оболочки и, превращаясь в тепло, приводит к повреждению соседних участков хрусталика.

Таким образом, лазерное излучение оказывает повреждающее действие на все структуры органа зрения. Основным механизмом повреждений - тепловое действие.

При оценке допустимых уровней энергии лазерного излучения необходимо учитывать суммарный эффект, производимый им как на прозрачные среды глаза, так и на сетчатку и сосудистую оболочку.

Оценим действие лазерного излучения на сетчатую оболочку глаза.

Оптические свойства глаза играют большую роль при определении повреждения сетчатки. При этом учитываются также качество изображения, размер зрачка (соответственно освещенность, создаваемая на сетчатке), спектральное поглощение и рассеяние средами глаза, а также спектральная отражательная способность глазного дна и рассеяние в различных слоях сетчатки.

Размер зрачка в значительной мере определяет количество энергии излучения, попадающей в глаз и, следовательно, достигающей сетчатки. Для глаза, адаптированного к темноте, диаметр зрачка колеблется от 2 до 8 мм; при дневном свете обычно диаметр зрачка составляет 2—3 мм, при взгляде на Солнце зрачок сужается до 1,6 мм в диаметре. Величина поступающей внутрь глаза световой энергии пропорциональна площади зрачка. Следовательно, суженный зрачок пропускает световой поток в 15—25 раз меньше, чем зрачок расширенный.

Площадь изображения источника излучения на сетчатке зависит от его углового размера, определяемого в основном расстоянием до источника. Для большинства неточечных источников размер изображения на сетчатке вычисляется по законам геометрической оптики. Зная эффективное фокусное

расстояние l нормального расслабленного глаза (для аккомодированного на бесконечность глаза $f=1,7$ см), можно вычислить размер D_r изображения источника лазерного излучения на сетчатке в том случае, если известны расстояние r до источника и размер D_i самого источника излучения

$$D_r = \frac{D_i f}{r} \quad (1)$$

Из этой формулы следует другая

$$\frac{A_i}{A_r} = \frac{r^2}{f^2} \quad (2)$$

где A_i — площадь источника излучения; A_r — площадь изображения источника излучения на сетчатке.

Данные формулы справедливы для источников с угловыми размерами до 20° . При угловых размерах, больших 20° , ошибка в определении D_r может составить более 5%.

Интенсивность облучения W_c роговицы и энергетическая яркость W_y лазерного источника с небольшими угловыми размерами пропорциональны и связаны выражением

$$W_y = \frac{W_c}{\Omega_s} = W_c \frac{r^2}{A_i} = W_c \frac{f^2}{A_r} \quad (3)$$

где Ω_s — телесный угол, под которым виден источник излучения.

Полная энергия W_r проникающая в глаз через зрачок площадью A_c и достигающая сетчатки, определяется из выражения

$$W_r A_r = r W_c A_c = r W \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (4)$$

где d_p — диаметр зрачка.

Поэтому для источников лазерного излучения с небольшими угловыми размерами количественную зависимость между полной энергией, проникающей в глаз, и яркостью источника можно выразить следующим образом:

$$W_r = \frac{\pi d_p^2 W_{я} r}{4 f^2} \approx 0.27 d_p^2 W_{я} r \quad (5)$$

где f — фокусное расстояние глаза, равное 1,7 см.

Уравнение (5.5) имеет большое Практическое значение, поскольку дает возможность вычислить допустимую яркость лазерного источника исходя из допустимой интенсивности облучения или освещенности сетчатки, не обращаясь к углу наблюдения.

Биологические эффекты воздействия лазерного излучения на кожу. Кожа является первой линией защиты организма от повреждения лазерным излучением. Кожа представляет собой не просто механический барьер, а важный, физиологически активный орган, обширные повреждения которого могут привести к гибели организма.

Степень повреждения кожи зависит от первоначально поглощенной энергии. Повреждения кожи, вызванные лазерным излучением, могут быть различными: от легкой эритемы (покраснения) до поверхностного обугливания и, в конечном счете, до образования глубоких дефектов кожи. Особенно значительные повреждения наблюдаются на пигментированных участках, например, на родимых пятнах, на местах с сильным загаром, или коже, обладающей естественным темным цветом. При воздействии на светлую кожу, лазерное излучение проникает в подкожные ткани и повреждает расположенные в них сосуды и нервы.

Повреждения кожи, вызванные воздействием лазерного излучения, близки по характеру к термическим ожогам и отличаются от них тем, что поврежденный участок имеет четкую границу, за которой находится небольшая область покраснения.

Пузыри, образующиеся при воздействии лазерного излучения, располагаются в эпидермисе, а не под ним. Вблизи поврежденных участков обнаруживаются свободные радикалы и другие признаки ионизации, что позволяет предполагать наличие кроме теплового других механизмов повреждения кожи.

С повышением энергии излучения происходит увеличение размеров очагов поражения. Облучение кожи несфокусированным излучением с энергией около 100 Дж приводит к утрате чувствительности облученного участка на несколько дней (без видимых повреждений). Под влиянием облучения изменяется активность некоторых ферментов, наблюдается образование в коже свободных радикалов. Гистохимические и люминесцентно-микроскопические исследования кожных покровов после воздействия лазерного излучения позволяют обнаружить определенные нарушения в углеводном и липидном (жировом) обменах кожи.

Длительное воздействие на кожу ультрафиолетового излучения ускоряет ее старение и может служить предпосылкой для злокачественного перерождения клеток. Облучение обширных участков кожи вызывает определенные сдвиги в обмене веществ, системе кроветворения, внутренних органах. Пороговые уровни энергии лазерного излучения, воздействующие на кожу, значительно выше пороговых уровней, воздействующих на глаза.

Минимальное повреждение кожи образуется при воздействии лазерного излучения с плотностью энергии 0,1—1 Дж/см² (в зависимости от степени окраски кожи и длительности воздействия). Наибольшее биологическое воздействие оказывает лазерное излучение с длинами волн 0,28—0,32 мкм. Оно наиболее глубоко проникает в кожу и обладает выраженным канцерогенным действием. Биологические эффекты, возникающие при облучении кожи лазерным излучением в зависимости от длины волны, приведены в табл. 1.

Действие лазерного излучения на внутренние органы. лазерное излучение (особенно дальней инфракрасной области спектра) способно проникать через ткани тела и

взаимодействовать с биологическими структурами на значительной глубине, поражая внутренние органы. Механизм образования повреждений объясняется тепловым действием сфокусированного излучения или влиянием ударной волны. Важной особенностью воздействия лазерного излучения на внутренние органы является чередование поврежденных и неповрежденных слоев тканей. Согласно одной из гипотез это явление связано с эффектом стоячих волн, которые образуются в результате отражения падающего излучения от костных поверхностей или границ между различными тканями. Поврежденные участки ткани совпадают с пучностями, где плотность потока энергии многократно возрастает по сравнению с плотностью потока энергии падающего излучения. Подобные повреждения могут не вызывать боли непосредственно после облучения и не выявляться при внешнем осмотре.

Т а б л и ц а 1

Биологические эффекты, возникающие при облучении кожи лазерным излучением.

Ультрафиолетовая область	Видимая область	Инфракрасная область
Различные фотохимические реакции, эритема, разрыв химических связей у большинства молекул, входящих в состав живой ткани, различные перерождения, стимулирование появления новообразований, образование свободных радикалов, действие на внутренние органы	В основном термическое действие	Выраженные деструктивные изменения термического характера (ожоги различной степени), микроскопические (гистологические и гистохимические) изменения, поражение внутренних органов
Примечание. Могут возникать изменения со стороны органов дыхания, пищеварения, сердечно-сосудистой и эндокринной систем, нарушение обмена веществ.		

Наибольшую опасность для внутренних органов представляет сфокусированное лазерное излучение.

Однако необходимо учитывать, что и нефокусированное излучение может фокусироваться в глубине ткани тела человека. Степень повреждения внутренних органов в значительной мере определяется интенсивностью потока излучения и цветом окраски органа. Так, печень является одним из наиболее уязвимых внутренних органов. Тяжесть повреждения внутренних органов также зависит от длины волны падающего излучения. Наибольшую опасность представляют излучения с длинами волн, близкими к спектру поглощения химических связей органических молекул, входящих в состав биологических тканей.

Воздействие лазерного излучения на организм в целом. В опытах на животных и при клиническом обследовании лиц, работающих с лазерами и подвергающихся воздействию малых доз излучения, показана возможность неблагоприятного действия лазерного излучения и на организм в целом.

У части работающих наблюдаются патологические изменения, проявляющиеся в виде функциональных расстройств в деятельности центральной нервной системы, что выражается в повышенной возбудимости нервных процессов, наличие сдвигов в стволовых структурах мозга и т. п.

Имеют место также явления вегетативно-сосудистой дисфункции, нарушения сердечно-сосудистой регуляции. Это проявляется в неустойчивости артериального давления крови, повышенной потливости, склонности пульса к замедлению.

У операторов лазерных установок иногда наблюдают повышенные раздражительность, утомляемость глаз и всего организма. Имеются данные об определенных изменениях в показателях периферической крови, выражающихся в общем уменьшении клеточных элементов и в первую очередь гемоглобина, тромбоцитов, эритроцитов и лейкоцитов.

Экспериментальные данные показывают что с помощью микровоздействия низкоэнергетического излучения газовых лазеров оказывается возможным направленно изменить внутриклеточные биохимические процессы; в одних случаях стимулировать эти процессы, в других — вызывать их торможение.

Так, замечено, что в определенных дозах красное монохроматическое излучение гелий-неонового лазера действует как биологической стимулятор, вызывая повышение регенеративной способности тканей.

Облучение глаз лазерным излучением сопровождается развитием дистрофических изменений в коре головного мозга.

Все это свидетельствует о том, что у людей, работающих с лазерными установками, могут возникать как патологические изменения, обусловленные тепловым механизмом действия излучения, так и различного характера функциональные изменения, обусловленные скрытыми биологическими эффектами. Чаще жалуются специалисты, работающие с излучением видимого диапазона в условиях малой освещенности, при сравнительно продолжительных воздействиях излучений на глаза, в тесных, мало приспособленных для проведения соответствующих работ помещениях.

В ряде случаев функциональные нарушения самостоятельно не проходят и требуют медицинского вмешательства. Несомненно большое значение в уменьшении неблагоприятного действия лазерного излучения на организм имеет строгое соблюдение соответствующих инструкций, правил и рекомендаций по технике безопасности при работе с лазерами. Меры безопасности при работе с лазерами складываются из использования общих (коллективных) и индивидуальных средств защиты и выполнения общих и индивидуальных мер предосторожности.

Общие меры предосторожности. Запрещается прямо смотреть на луч лазера или на его зеркальное отражение, если плотность энергии превышает допустимые для глаза уровни облучения.

Не следует наводить луч лазера, глядя на него невооруженным глазом, так как необходимость наблюдения вдоль оси лазерного луча значительно увеличивает опасность поражения органа зрения в результате отражения.

Необходимо принимать меры, исключая возможность приближения персонала к предполагаемой траектории пучка с любой стороны.

Точки фокусировки пучка при работе ОКГ должны быть защищены диафрагмами; в конце пучка устанавливается ловушка для поглощения излучения и защиты от брызг, испарений и аэрозолей, выделяемых исследуемым веществом. Для уменьшения рассеяния света линзы, кюветы, призмы и другие устройства, стоящие на пути распространения светового пучка, должны снабжаться блендами. На конечном участке лазерного луча рекомендуется устанавливать мишень.

Все автоколлимационные оптические устройства и другие приспособления для визуальной юстировки ОКГ должны быть снабжены постоянно вмонтированными защитными фильтрами с полосой поглощения, включающей как основную частоту лазера, так и ее наиболее интенсивные гармоники. Защитные стекла фильтров необходимо периодически проверять, чтобы гарантировать их оптическую плотность. Эти проверки необходимы, так как в процессе работы с мощными световыми потоками защитные стекла (очки) могут изменить свои первоначальные оптические характеристики.

Нужно всегда помнить, что защитные очки с фильтрами, задерживающими излучение на частоте, генерируемой данной установкой, обеспечивают лишь частичную защиту. Необходимо использовать только те очки, которые рассчитаны на защиту от излучения данного лазера, при этом должна быть исключена возможность ошибочного применения очков, рассчитанных на другую длину волны. С этой целью рекомендуется применять оправы различного цвета, а на светофильтре указывать его оптическую плотность. Защитные очки, подвергшиеся воздействию излучения с высокой плотностью потока, могут частично утратить свои защитные свойства, и потому должны изыматься из употребления.

В процессе работы с лазерным излучением может появиться необходимость прерывания лазерного луча огнестойкой мишенью. И в этом случае обслуживающий персонал должен находиться на достаточно большом расстоянии от лучепроводящего тракта.

В некоторых случаях целесообразно даже ограждать весь тракт, используя для этой цели волноводы (световоды). Работы с лазерами должны проводиться при ярком общем освещении. В этом случае размеры зрачка наименьшие, что способствует уменьшению энергии излучения, которая может случайно попасть в глаз.

Если работу с мощным лазером проводится на открытом пространстве, то в этом случае запрещается передвижение людей и транспорта, в том числе и воздушного, в пределах потенциально опасных зон.

На лазерных установках средней мощности необходимо использовать блокировки и автоматические затворы для защиты глаз операторов. При работе с открытыми установками ОКГ запрещается вносить в зону луча блестящие предметы.

При проведении работ с импульсными ОКГ работающих в импульсном режиме с очень малой частотой следования импульсов (менее 0,1 Гц) должна быть установлена сигнализация: световая—во время заряда конденсаторной батареи и звуковая - за 2-3 с перед излучением мощного импульса. На дверях помещения, в котором расположены особо мощные ОКГ, устанавливается предупредительная сигнализация в виде световых табло, включающихся автоматически с началом заряда батарей конденсаторов. Световые сигналы должны быть хорошо различимы через защитные очки.

При использовании батарей конденсаторов с энергией полного заряда менее 15000 Дж они могут располагаться в одном помещении с пультом управления. Батареи большей энергии заряда следует располагать в соседнем блокируемом помещении или вне помещения, так как они могут при заряде разрушаться.

Ограждения, препятствующие проходу людей в зону с повышенной интенсивностью облучения, должны быть изготовлены из непрозрачного теплостойкого материала и могут представлять собой экраны, щиты, шторы, занавески и т. п.

Мишень - устройство, ограничивающее распространение лазерного луча, должна быть изготовлена из несгораемого и неплавящегося материала. Для создания рассеянного отражения

поверхность мишени должна быть матового цвета, с возможно меньшим коэффициентом отражения света на частоте излучения лазера. Окружающие мишень поверхности рекомендуется окрашивать в светлый цвет для создания более благоприятных условий адаптации глаз. Широкое распространение получили мишени, выполненные из асбоцемента. Еще лучше полностью исключить необходимость непосредственного наблюдения воздействия лазерного луча на мишень. Для этой цели удобны устройства, включающие в себя отражающие фокусирующие приспособления с диффузионными экранами и телевизионной системой. Детектор света, размещенный в лаборатории, может дать необходимое представление об опасности отраженных лазерных лучей.

Химические и жидкостные лазеры могут быть опасны для здоровья людей (например, жидкостный лазер на оксигидрохлориде селения с длиной волны излучения 1,06 мкм).

При работе с лазерами следует всегда соблюдать правила пожарной безопасности. Даже при работе с маломощными лазерами существует опасность возникновения пожара и взрывов от взаимодействия лазерного излучения с некоторыми растворителями. Для уменьшения вредных последствий от взрывов рекомендуется ставить ловушки, укрепляемые над лазерной установкой.

Меры предосторожности при работе с электричеством. При использовании лазерных систем необходимо соблюдать общие меры предосторожности, принятые при работе с электричеством. Прежде всего необходимо следить за правильным размещением кабелей и другой электропроводки между источником питания и лазером, а также обеспечивать надежную защиту системы электропитания зарядки конденсаторов. Для предотвращения случайного или непреднамеренного срабатывания лазера следует очень тщательно продумать расположение кнопок пуска. Большое значение при этом приобретает также размещение регистрирующих и измерительных приборов. Кабели, различные соединения, шкафы и переключатели должны содержаться в образцовом порядке.

Перед чисткой или ремонтом электрооборудования, связанного с зарядом конденсаторов, последние надо разрядить. Операторы не должны покидать помещение (оборудование) до тех пор, пока с конденсаторов не будет снято напряжение (что проверяется вольтметром). Все схемы и цепи, находящиеся под напряжением, должны иметь кожухи, что устранит возможность случайного соприкосновения с этими элементами. Все кожухи и другие защитные устройства должны быть заземлены.

Индивидуальная защита. Ввиду того, что воздействие лазерного излучения, особенно диффузно отраженного, на организм человека изучено недостаточно и предельно допустимые гигиенические нормы' по монохроматическим излучениям в видимой и в соседних с ним областях оптического диапазона пока еще твердо не установлены, при решении вопросов защиты от излучений ОКГ следует стремиться к уменьшению плотностей потоков энергии на рабочих местах.

Индивидуальная защита глаз достигается применением специальных светофильтров, оптическая плотность которых на всех длинах волн, излучаемых ОКГ, должна быть достаточно большой для того, чтобы снизить интенсивность облучения глаз до безопасной величины. В качестве светофильтров рекомендуется применять стекла с соответствующей оптической плотностью.

Цветные стеклянные фильтры обеспечивают ослабление не более чем в 10^9 раз, очки с диэлектрическими покрытиями — не более чем в 10^8 .

Спектральная характеристика светофильтра очков должна обеспечивать не только достаточное подавление излучения ОКГ, но и пропускание большей части частотного спектра видимого света, с тем, чтобы работающий сохранил способность видеть достаточно хорошо предметы, за которыми он ведет наблюдение и которыми манипулирует, а также свет ламп, используемых в системе световой сигнализации.

Форма оправы защитных очки) в должна быть такой, чтобы полностью исключить возможность попадания излучения ОКГ внутрь очков через щеки между оправой и лицом; оправка должна

обеспечивать широкое поле зрения.

Во избежание утомления глаз из-за запотевания стекол оправа очков должна иметь светонепроницаемые щели для вентиляции. Целесообразно иметь набор очков с коробчатой оправой, не препятствующей одновременному пользованию обычными корректирующими очками. В паспорте на очки должен быть указан диапазон длин волн, на которые очки рассчитаны, а также указана величина оптической плотности светофильтров.

Для защиты глаз при работе с аргоновым лазером целесообразно использовать защитные очки и экраны из плексигласа янтарного цвета или из пластмассы рубиновой окраски. Так, при работе с аргоновыми лазерами с мощностью излучения 3—10 Вт можно использовать плексиглас типа «2442» янтарного цвета с оптической плотностью 2. Наряду с защитой от основного излучения аргонового лазера необходима также защита от ультрафиолетового излучения, исходящего от газоразрядных трубок лазерной установки.

Защита от ультрафиолетовых и инфракрасных лучей наиболее ответственна, так как глаз человека не восприимчив к ним.

При работе с такими лазерами (например, с лазерами на углекислом газе) мишень должна тщательно экранироваться, а руки и одежду следует держать как можно дальше от нее.

Надежную защиту глаз от невидимого инфракрасного излучения газового лазера на углекислом газе обеспечивает фильтр, выполненный из двух пластинок плавленого кварца.

Излучение, газового лазера на гелий — неоне с генерируемой длиной волны 0,63 мкм эффективно задерживается фильтром из стекла Вg-18. Однако газовые и полупроводниковые лазеры могут генерировать помимо ультрафиолетового излучения и многие волны инфракрасной области, при этом инфракрасное излучение благодаря незначительной мощности какого-либо неблагоприятного воздействия на глаз (при кратковременном действии) не оказывает. Однако облучение на протяжении длительного времени может вызывать необратимые поражения глаз.

Лазеры на углекислом газе с длиной волны излучения 10,6 мкм и мощностью свыше 100 кВт могут вызвать ожоги поверхностных слоев роговицы, поскольку такое излучение почти полностью ею поглощается.

В соответствии с ГОСТ 9411—66 для применения в светофильтрах защитных очков рекомендованы следующие марки стекол (табл.1).

Таблица 1

Некоторые параметры стекол, используемых для светофильтров

Диапазон длин волн, поглощаемых стеклом, нм	Тип стекла	Марка стекла
Меньше 350	ЖС — желтое стекло	ЖС10, ЖС11
„ 450	ЖС—желтое стекло	ЖС17, ЖС18
„ 540	ОС — оранжевое стекло	ОС1, ОС12

При работе с лазерами персонал должен быть одет в халаты, пользоваться защитными перчатками, специальными экранами для защиты кожи и защитными очками. В первую очередь следует обеспечить надежную защиту от прямого излучения.

Таковы общие и индивидуальные меры по обеспечению требований по технике безопасности.

Порядок выполнения работы.

1. Включить твердотельный лазер согласно инструкции по эксплуатации.Получить устойчивую генерацию излучения лазера.
2. Провести измерения энергии излучения с помощью измерителя ИКТ-1Н.
3. Определить предельно допустимые уровни облучения сетчатки глаза для расстояний до источника излучения от 0,5-3 (м) и диаметров зрачка адаптированного к темноте и дневному освещению.
4. Составить отчет о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Основные, опасные и вредные производственные факторы при эксплуатации лазерного оборудования.
2. Особенности воздействия лазерного излучения на биологические структуры.
3. Воздействие лазерного излучения на глаза.
4. Воздействие лазерного излучения на кожу и внутренние органы человеческого организма.
5. Патологические изменения в организме человека при воздействии лазерного излучения.
6. Общие правила безопасности при работе с лазерным излучением.

Литература.

1. Средства и методы квантовой электроники в медицине. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1976.
2. Б. Н. Рахманов, Е. Д. Чистов Безопасность при эксплуатации лазерных установок. М.: Машиностроение, 1981.
3. Лазерное излучение/Под редакцией В. Я. Гранкина. М.: Изд. Министерства обороны СССР, 1977.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение физических основ процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом, решение уравнения теплопроводности для твердого тела при облучении его лазерным излучением.

Теоретическое введение.

Использование лазерной энергии для обработки материалов основано на поглощении лазерного излучения веществом. При взаимодействии с поверхностью материала излучения частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и, как правило, достаточно быстро переходит в тепло. В этом случае изменение плотности лазерного потока по глубине описывается известным уровнем Бугера:

$$E(x) = E_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha x} \quad (1)$$

где $E(x)$ - световая энергия, проникающая на глубину x ;
 E_0 - энергия, падающая на поверхность; A - поглощательная способность материала; α - линейный коэффициент поглощения; x - координата, отсчитываемая от поверхности в глубь материала.

Количество энергии, поглощенной в слое толщины Δx ,

$$|\Delta E(x)| = E_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha x} \quad (2)$$

Формула (1) применима к различным материалам в широком диапазоне длин волн. В то же время конкретные значения входящих в нее величин A и α , а также механизм поглощения лазерного излучения и перехода его в тепло могут сильно отличаться для материалов различных классов. Поглощательная способность материала $A = (1 - R)$, где R - коэффициент отражения, показывает, какая часть энергии падающего излучения поглощается и участвует в процессе нагрева вещества. Поглощательная способность зависит от длины волны излучения, состояния поглощающей поверхности и температуры.

Коэффициент отражения для большинства материалов увеличивается с ростом длины волны, что определяет требования к энергетическим характеристикам лазера: лазер с большей длиной волны должен обладать большей мощностью, чем лазер с меньшей длиной волны, для оказания эквивалентного воздействия на начальном этапе поглощения излучения.

Коэффициент отражения зависит так же от ρ_a - среднеарифметического отклонения профиля шероховатости поверхности и в общем случае описывается выражением:

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{5\pi\rho_a \cos \varphi}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3)$$

При нормальном падении излучения

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{5\pi\rho_a}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (4)$$

где R - измеряемый коэффициент отражения; R_0 - коэффициент отражения, определяемый по формуле Френеля; λ - длина волны падающего излучения.

Анализируя эти выражения, можно сделать вывод, что для данной длины волны излучения, увеличение шероховатости поверхности (по сравнению с оптически гладкой ($\rho_a \ll \lambda$)) приводит к снижению коэффициента отражения. Для металлов наличие шероховатостей поверхности обеспечивает возрастание резонанса локального поля, обусловленного возбуждением в поверхностных шероховатостях, осциллирующих дипольных моментов (электронного газа). Взаимодействуя друг с другом, они образуют коллективные моды, кулоновское поле усиливает поле падающей волны. Таким образом, шероховатости служат аккумуляторами энергии, поступающей из поля падающей волны. Поглощательная способность материала зависит от температуры во время действия потока излучения. В первом приближении зависимость $A(T)$ может быть представлена в виде:

$$A = a + b \cdot T$$

Для неметаллических материалов возможно падение A с ростом температуры. Значение коэффициентов a и b температурной зависимости, приведены для ряда материалов в справочниках по лазерной технологии. Так, например, для окиси алюминия: $A(T) = 0,77 - 4,28 \cdot 10^{-4} T$.

В качестве критерия необходимости учета зависимости поглощательной способности от температуры можно использовать параметр:

$$\beta = \frac{E_0 \cdot b}{k \sqrt{k_1}} \quad (5)$$

где E_0 - плотность потока падающего излучения; k_1 - коэффициент сосредоточенности теплового источника при гауссовой интенсивности, k - коэффициент теплопроводности.

При $|\beta| < 1/5$ учет температурной зависимости дает вклад не более 10%, следовательно, при расчетах температурную зависимость $A(T)$ можно не принимать во внимание.

Коэффициент α в выражении (1) характеризует толщину слоя вещества $\delta = 1/\alpha$, после прохождения которого интенсивность света уменьшается в $e=2,7$ раз.

Для металлов значение α , как правило, составляет величину $10^4 - 10^5 \text{ см}^{-1}$, то есть энергия лазерного излучения в металлах поглощается в приповерхностном слое толщиной $10^{-5} - 10^{-4} \text{ см}$. Значение α зависит от частоты света ν , химической природы и состояния вещества. Связь α с комплексным показателем преломления поглощающего вещества имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \frac{4\pi k \nu}{c} = \frac{2\pi k \omega}{c} = \frac{2\omega k}{V} \quad (6)$$

где $V = c/n$ - скорость света в среде; c - скорость света в вакууме;

n, k - оптические характеристики материала $n^2(1-k^2)$, где ϵ - диэлектрическая проницаемость материала.

Для металлов $k \gg 1$, поглощение среды в этом случае называют "металлическим", если $k \ll 1$, поглощение среды типично для диэлектриков. В этом случае обычно полагают:

$$\alpha = \frac{2\omega \sqrt{\epsilon}}{c} = \frac{4\pi \nu \sqrt{\epsilon}}{c} = \frac{4\pi \sqrt{\epsilon}}{\lambda} \quad (7)$$

Говоря о лазерном излучении как источнике энергии в различных технологических процессах, мы должны рассматривать порождаемый им высокотемпературный практически безинерционный источник тепла, на поверхности обрабатываемого изделия, зависящий так же от энергетических характеристик лазерного излучения.

Энергетический вклад лазерного излучения в различные технологические процессы определяют величины q и τ .

Как известно:

$$E = p \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau \quad (8)$$

где E - энергия поглощенного излучения; p - мощность поглощенного излучения; τ - время действия излучения; q - плотность мощности излучения; S - площадь облучения.

Из (8) видно, что увеличение энергетического вклада в технологический процесс достигается увеличением q или τ , однако характер нагрева при этом будет различный.

Высокие скорости нагрева и остывания в зоне действия лазерного излучения характерны для импульсного режима работы лазера: чем более короткий импульс излучения τ , тем выше плотность мощности и меньше масса нагреваемого материала. При увеличении длительности импульса, а также в случае непрерывного потока лазерного излучения за счет возрастающей роли теплопроводности нагревается все большая масса материала. При этом реализуются мягкие условия нагрева и “длительного” остывания, определяемого механизмами теплопередачи и теплообмена со средой.

Известно, что в результате перехода энергии лазерного излучения в тепло начинается нагревание материала. Перенос тепла в твердом теле осуществляется механизмами теплопроводности, из которых для металлов и сильно выраженных полупроводников основным является электронная теплопроводность, а для неметаллов - решеточная. Превращение поглощенной энергии излучения в тепловую энергию материала происходит почти мгновенно (порядка 10^{-11} с), поэтому температура поверхности материала в область воздействия

быстро возрастает, примерно сохраняя распределение плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка. Одновременно происходит перенос тепла вглубь материала. Для гауссова распределения мощности излучения в фокусе распределения температуры в материале, получаемое в результате теплопроводности, описывается зависимостью:

$$T(r, z, t) = \frac{2p}{\rho c (4\pi a)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(\tau + t)\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4a\tau} - \frac{r^2}{4a(t + \tau)}\right) dt \quad (9)$$

температура в центре фокуса лазерного пучка на поверхности материала

$$T_0(0, 0, t) = \frac{p_0}{\pi r_0^2 \rho c a (4\pi a \tau)^{1/2}} \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{1/2} \quad (10)$$

где $p_0 = q \cdot s$ - мощность излучения, введенная в материал через площадку s ; $\tau = a/4 r_0^2$; r_0 - радиус пятна излучения по уровню $1/e$ от максимальной интенсивности; c - коэффициент теплопроводности; ρ - плотность материала; a - коэффициент теплопроводности; t - текущее время.

В случае, когда теплоотводом можно пренебречь, температуру поверхности можно определить из уравнения:

$$c(T) \rho(T) \frac{dT}{dt} = A(T) \frac{qT}{\delta(T)} \quad (11)$$

где c , ρ - теплоемкость и плотность материала соответственно.

Интегрируя, можно получить выражение для энергозатрат лазерного излучения, обеспечивающих нагрев поверхности до заданного значения T^1 к моменту времени t^1 :

$$E^1(t^1) = \int_0^{t^1} q(t) dt = \int_0^{T^1} f(t) dt = F(T^1) \quad (12)$$

где $f(t) = c(T)\rho(T)\frac{\delta(T)}{A(T)} > 0$

Выражение (11) можно преобразовать к виду:

$$T^I = F^{-1}(E(t^I)) \quad (13)$$

Порядок выполняемой работы.

Решить уравнение теплопроводности для твердого тела при облучении его лазерным излучением

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \Delta T = \frac{f(x, y, z, t)}{\rho c}$$

где T - температура в произвольной точке материала с координатами x, y, z в момент времени t ; ρc - удельная теплоемкость вещества.

Объемная плотность мощности лазерного излучения задается функцией:

$$f(x, y, z, t) = \alpha(x)q(y, z, t) \exp\left(-\int_0^x \alpha(x)dx\right)$$

где $q(y, z, t)$ - функция, характеризующая распределение плотности поглощения светового потока на поверхности материала и изменение его во времени.

Теплообменом облучаемой поверхности с окружающей средой можно пренебречь.

Граничное условие на поверхности ($x=0$)

$$\frac{\partial T}{\partial x}(0, y, z, t) = 0$$

Облучаемый образец считать полубезграничной средой, имеющей в начальный момент времени температуру T_n :

$$T(\infty, y, z, t) = T(x, y, z, 0) = T_n$$

Будем полагать, что $T_n = 0$. Излучением равномерно освещается вся поверхность материала, и плотность поглощенного светового потока не меняется со временем, то есть:

$$f(x, y, z, t) = \alpha \cdot q \cdot \exp(-\alpha x)$$

Необходимые параметры и характеристики для решения уравнения даются преподавателем.

Контрольные вопросы.

1. Основные физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с веществом.
2. Влияние оптических постоянных материала на характер взаимодействия с лазерным излучением.
3. Нагрев материалов лазерным излучением с учетом теплофизических коэффициентов.
4. Нагрев твердых материалов лазерным излучением с различными временными и энергетическими характеристиками.

Литература.

1. Н.Н. Рыкалин и др. Лазерная обработка материалов.- М.: Машиностроение. 1975.
2. К.М. Банас, Уэбб. Лазерная обработка материалов. - ТИИЭР, 1982. т.70, №6.
3. Лазеры в технологии. / Под ред. М.Ф.Стельмаха. - М.Энергия, 1975г.
4. Г.Ф. Мучник, И.Б. Рубанов. Методы теории теплообмена. - М.: Высшая школа, 1974г.
5. М.Н. Либенсон, Г.С. Романов, Я.А. Имас. Учет влияния температурной зависимости оптических постоянных металла на характер зависимости его нагрева излучением ОКГ. - ЖТФ, 1968, 38 №7, с. 1116-1119.
6. И.П. Добровольский, А.А. Углов. О нагреве твердых тел лазера

- с учетом температурной зависимости поглотительной способности. - Квантовая электроника, 1974, №6 с. 1423.
7. Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, М.М. Низамегдинов Расчет нагрева материалов лазерным излучением с учетом температурной зависимости теплофизических коэффициентов. - Квантовая электроника, 1977, №7. с.1509.
8. Н.М. Беляев, А.А. Рядно Методы теории теплопроводности. - М. Высшая школа, 1982.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.

ИМПУЛЬСНАЯ ШОВНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение процесса лазерной импульсной шовной сварки металлов, отработка технологических режимов сварки однородных и разнородных металлов и проведение структурного анализа сварных соединений.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: лазерная технологическая установка «Квант-12», измеритель энергии ИКТ-1Н, осциллограф, металлографический микроскоп, шлифовальные и полировальные порошки, реактивы для травления.

Теоретическое введение.

Сплошной шов при импульсной лазерной сварке формируется путем наложения лазерных пятен друг на друга с перекрытием их на поверхности свариваемого материала. Для расчета скорости сварки вводится коэффициент перекрытия:

$$K=L/D \quad (1)$$

где L - длина перекрытия сварных лазерных пятен, D - диаметр лазерного пятна. Геометрические характеристики шва при импульсной сварке лазерным пучком круглого сечения показаны на рис.1. Поскольку сварная точка при лазерной сварке имеет сферическую или коническую форму, то глубина шва h зависит от коэффициента перекрытия k . Выбор коэффициента перекрытия определяется необходимой минимальной глубиной проплавления, от которой, в свою очередь, зависит прочность и герметичность шва. Для обеспечения наибольшей прочности глубина шва должна быть близка к максимальной глубине проплавления, а коэффициент перекрытия $\rightarrow k 1$. Скорость сварки при этом мала. Ее можно определить по формуле:

$$V=f \cdot D(1-k) \quad (2)$$

где f - частота следования импульсов лазера.

Основными требованиями при сварке материалов являются обеспечение герметичности и вакуумной плотности шва. Внешний вид сварного шва показан на рис.2. Значения глубины шва лежат в пределах 0,1 - 0,3 мм, коэффициента перекрытия 0,3-0,5.

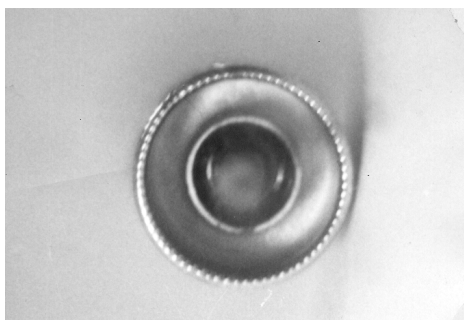


Рис.2 Внешний вид сварного шва.

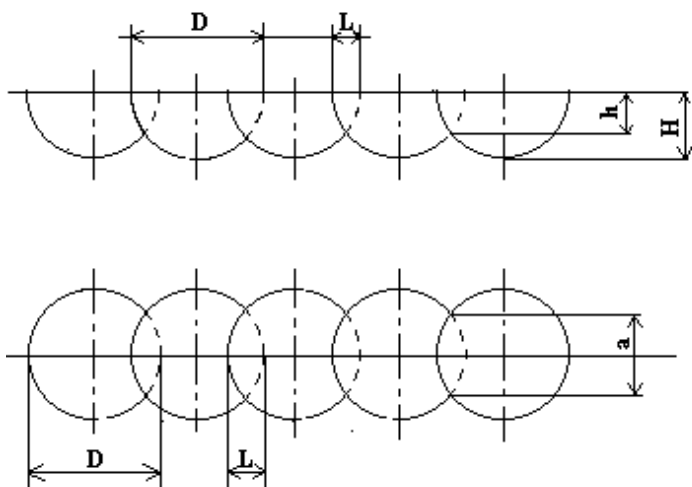


Рис.1 Схема образования и характеристики сварного шва.
 h - глубина шва, H -максимальная глубина проплавления, a -ширина шва.

Для выполнения лабораторной работы используется лазерная технологическая установка “Квант-12”. Установка предназначена для шовной сварки однородных и разнородных металлов и сплавов сфокусированным излучением с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм. При сварке пар (мельхиор+ковар, ковар+ковар) глубина проплавления составляет 0,3 мм при скорости сварки 150 мм/мин.

Установка также позволяет сваривать детали из таких материалов, как никель, нержавеющая сталь, титан и др. В излучателе лазера использован активный элемент из алюмоиттриевого граната Г10-Н диаметром 6 мм и длиной 90 мм.

В качестве источника оптической накачки в установке используется импульсная ксеноновая лампа ИНПЗ-7х80А. Излучение лампы концентрируется на активном элементе при помощи осветительной камеры, выполненной в виде кварцевого цилиндра с серебряным покрытием.

Охлаждение лампы и активного элемента, а также фильтрация ультрафиолетового излучения осуществляется с помощью водного раствора K_2CrO_4 . Резонатор лазера образован двумя сферическими зеркалами. Источник питания импульсной лампы МТ-42 состоит из источника тока, выпрямителя и емкостного накопителя. Разряд емкостного накопителя на импульсную лампу с предварительно ионизированным газом происходит через разрядный коммутатор.

Управление осуществляется системой управления СУМ-10А. В качестве источника тока, обеспечивающего линейный заряд емкостного накопителя, использован индуктивно-емкостный преобразователь. Емкостный накопитель источника питания из четырех LC-звеньев обеспечивает получение прямоугольного импульса накачки. Для изменения длительности импульса часть конденсаторов емкостного накопителя может быть отключена. Лазер установки «Квант-12» позволяет получать импульсы с энергией излучения до 5 Дж. Максимальная частота повторения импульсов 20 Гц, максимальная средняя мощность излучения 30 Вт. Длительность лазерного импульса на уровне половины амплитуды составляет 1,5; 2; 2,5; 4 мс. Временная структура импульса характеризуется отсутствием пиков.

Расходимость излучения при средних значениях энергии составляет 20 мрад. Нестабильность энергии лазерного излучения не превышает 5%.

На рис.4 представлена оптическая схема установки. Излучение лазера, выходя через зеркало резонатора 3 с коэффициентом пропускания 0,7, попадает в телескопическую систему, состоящую из короткофокусного компонента 5 и длиннофокусного 6. Телескопическая система уменьшает расходимость лазерного пучка. Интерференционное зеркало 7 направляет излучение в фокусирующий объектив 9 с фокусным расстоянием 50 или 100 мм. При помощи телескопической системы и объектива излучение лазера может быть сфокусировано в пятно диаметром от 0,25 до 1,2 мм.

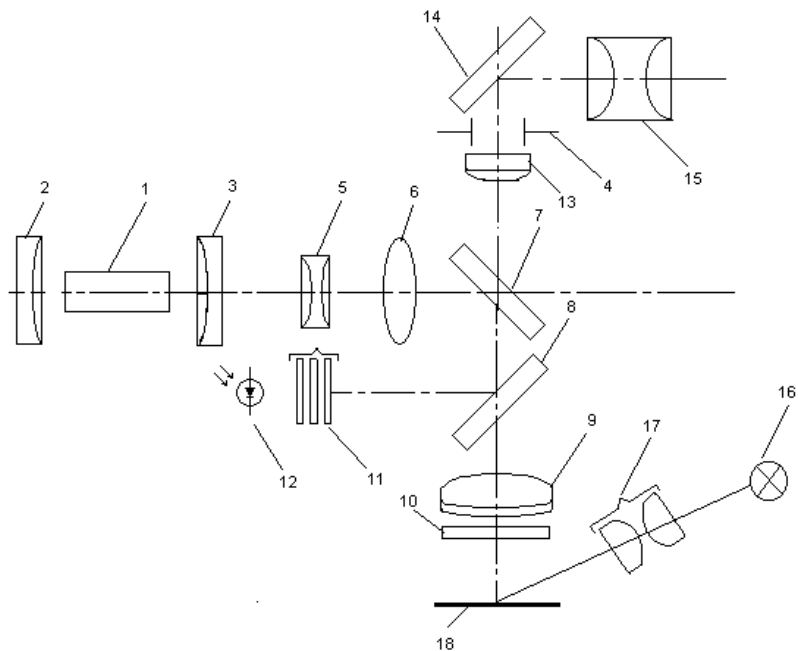


Рис.4 Оптическая схема лазерной установки “Квант-12”.

1- активный элемент; 2,3- зеркала резонатора; 4- затвор; 5,6- телескопическая система ; 7-поворотное интерференционное зеркало; 8- плоскопараллельная пластина; 9- фокусирующий объектив; 10- защитное стекло; 11,12- система для измерения энергии излучения; 13- тубусная линза; 14- поворотное зеркало; 15-бинокулярная система; 16,17- система подсветки; 18- плоскость обработки.

Изменение диаметра пятна осуществляется ступенчато благодаря применению сменных короткофокусных компонентов телескопической системы или плавно путем перемещения длиннофокусного компонента.

Визуальная часть оптической системы кроме объектива включает тубусную линзу 13, поворотное зеркало 14 и бинокулярную систему 15. Для защиты зрения от излучения лазера и излучения плазменного факела, возникающего в зоне сварки, предусмотрен затвор 4. Работа затвора синхронизирована с подачей лазерных импульсов таким образом, что в момент импульса визуальная оптическая система оказывается перекрытой.

Установка “Квант-12” снабжена индикатором энергии излучения ИЭ-3. Для отвода части излучения на фотоприемник индикатора в оптическую систему введена плоскопараллельная стеклянная пластина 8. Установка содержит систему для подачи инертного газа в зону обработки с целью предотвращения окисления сварного шва и приспособление для перемещения деталей со скоростью до 300 мм/мин.

Порядок выполнения работы.

1. Изучить устройство и работу лазерной технологической установки “Квант-12”.
2. Включить установку согласно инструкции по эксплуатации.
3. Измерить диаметр лазерного пятна, длину перекрытия.
4. Рассчитать скорость сварки.
5. Выбрать оптимальные режимы для сварки однородных и разнородных металлов и сплавов: (нержавеющая сталь+нержавеющая сталь, нержавеющая сталь +ковар): энергию импульса излучения, длительность импульса, скорость перемещения стола, коэффициент перекрытия лазерных пятен, частоту следования импульсов.
6. Изготовить и сфотографировать шлиф сварного соединения.
7. Определить глубину проплавления для ковара.
8. Составить отчет о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Воздействие лазерного излучения на металлы и сплавы.

2. Параметры лазерного излучения влияющие на результаты сварки.
3. Коэффициент перекрытия, скорость сварки. Схема образования сварного шва.
4. Оптическая схема лазерной технологической установки.
5. Методика изготовления микрошлифов.

Литература.

1. А.Г. Бузмаков и др. Импульсная шовная сварка. –Электронная промышленность ,1976,№1, с.45-53.
2. Лазеры в технологии. Под ред. Стельмаха М.Ф.–М.: Энергия, 1975, с.82-102.
3. Н.Н. Рыкалин , А.А. Углов, А.Н. Какора Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975, 295 с.
4. Дж. Рэди Промышленные применения лазеров. – М.: Мир,1981, с. 390- 397.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

ТЕРМООБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение процессов термообработки материалов импульсным излучением и проведение лазерной закалки образцов сталей У8, У10 и ХВГ.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: лазерная технологическая установка, металлографический микроскоп, микротвердомер ПМТ-3, измеритель энергии ИКТ-1Н, осциллограф, шлифовальные и полировальные порошки, реактивы для травления.

Теоретическое введение.

Лазерная термообработка применяется для закалки стальных поверхностей, высокоротского отжига фольги, удаления пленок и других поверхностных осадений, а также впекания порошкового материала в металлическую поверхность.

Одной из важных особенностей поверхностного упрочнения является сохранение качества основной массы металла, которая также разогревается вместе с поверхностным слоем. Основным процессом при закалке является нагревание поверхности до температуры, при которой исчезает аустенитная структура. При этом углерод начинает существовать как твердый раствор карбида железа в гамме железа. Затем производится охлаждение до температуры, при которой еще не успевает образоваться устойчивое состояние перлита с ферритом или цементитом, а образуется очень прочный твердый раствор карбида в α - железе, известный как мартенсит. При лазерной закалке количество энергии, вложенной в металл, является достаточным для поверхностного нагрева, а масса металла остается холодной. В этом случае нагретая поверхность будет охлаждаться за счет теплопроводности с достаточно высокой скоростью, в первый момент времени она будет равной приблизительно $T_0/2\tau$, где T_0 - поверхностная температура; τ - продолжительность подогревающего лазерного импульса. Временная зависимость распространения тепла для круглого лазерного потока однородной интенсивности и радиуса a , падающего вдоль оси z , перпендикулярной к плоскости поверхности полубесконечной среды, определяется выражением:

$$T_{ст}(z) = (q/k) \left(\sqrt{z^2 + a^2} - z \right) \quad (1)$$

где q - лучистый поток, поглощенный поверхностным слоем обрабатываемого материала; k - теплопроводность. Точная фокусировка лазерного пучка позволяет осуществить упрочнение на строго ограниченных участках поверхности в местах, подверженных износу, сохраняя исходную структуру основной массы детали.

Установлено, что при высокой скорости охлаждения такого приповерхностного слоя, нагретого за время действия лазерного импульса, могут быть достигнуты высокие значения микротвердости (до $H_{100}=1000$ кг/мм² и более), что повышает износостойкость. Для термообработки используется лазерная установка, оптическая схема которой приведена на рис.1.

В установке используется лазер на стекле, активированном ионами неодима Nd^{+3} . Длина волны излучения $\lambda=1,06$ мкм. Режим работы установки импульсный, с длительностью импульса 4-7 мсек и энергией излучения 30 Дж. Оптическая система установки позволяет фокусировать излучение в пятно диаметром 0,4-1,4 мм.

На рис.2 показана фотография упрочненного образца из стали У8, которая дает представление о характере поверхности, обработанной импульсным лазерным излучением.

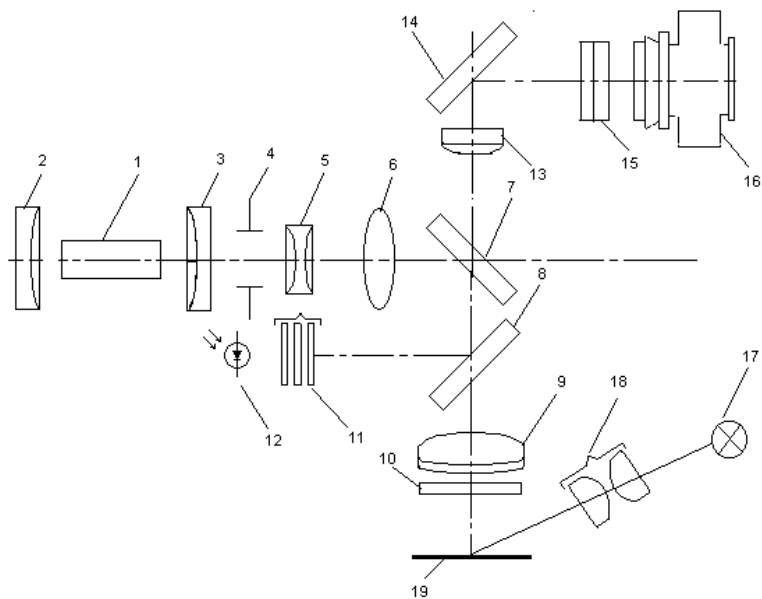


Рис.1. Оптическая схема лазерной установки.

1-активный элемент; 2,3- зеркала резонатора; 4- ирисовая диафрагма; 5,6- телескопическая система; 7- интерференционное зеркало; 8- плоскопараллельная пластина; 9- фиксирующий объектив; 10- защитное стекло; 11- светофильтры; 12- фотодиод ФД-24К; 13- тубусная линза; 14- зеркало; 15- светофильтры; 16- бинокулярная насадка; 17,18-система подсветки; 19- плоскость обработки.

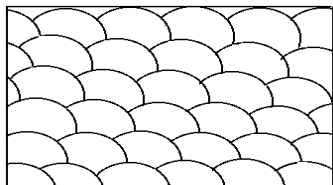


Рис.2 Поверхность упрочненного образца для стали У8.

Приведем зависимость глубины z , закаленного слоя стали У8 от энергии излучения E при двукратном облучении образца на воздухе и в аргоне (рис.3). Пунктиром показаны участки кривых, которые соответствуют энергии излучения, при которой изменяется геометрия поверхности вследствие оплавления. Минимальная энергия, при которой наступает оплавление, называется критической.

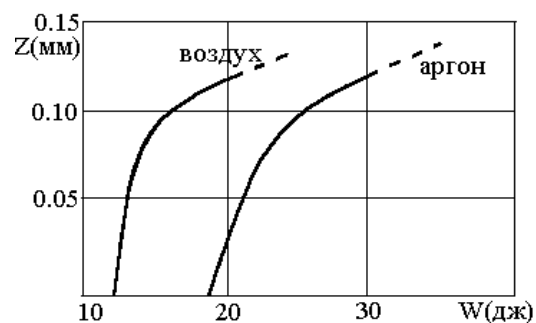


Рис.3 Зависимость глубины z закаленного слоя стали У8 от энергии излучения E .

Критическая энергия при обработке на воздухе составляет 20 Дж, а соответствующая плотность мощности $0,8 \times 10^4$ Вт/см²; при обработке в аргоне - 31 Дж и плотность мощности $1,2 \times 10^4$ Вт/см². Микротвердость закаленной поверхности изменяется микротвердомером ПМТ-3. Распределение микротвердости по глубине z закаленного в аргоне образца из стали У8 показано на рис.4.

Исходная микротвердость показана пунктиром. Плотность мощности составляет $1,2 \times 10^4$ Вт/см².

Микротвердость у поверхности и на глубине до 0,112 мм составляет 1080 кг/мм². Между упрочненным слоем и основным материалом имеется зона высокотемпературного отпуска шириной около 0,02 мм. Следует отметить, что микротвердость в зоне отпуска ниже микротвердости исходного материала.

При упрочнении протяженных участков поверхности отдельные пятна закалки разделены узкими зонами с пониженной микротвердостью.

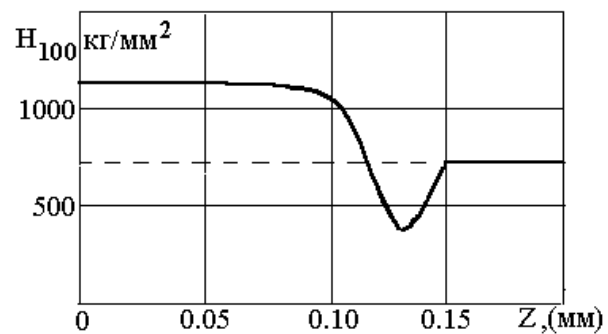


Рис.4 Распределение микротвердости по глубине для образца из стали У8.

На рис.2 они видны в виде темных границ. Эти зоны возникают в местах перекрытия лазерных пятен, в результате того, что на

закаленный предыдущим импульсом участок воздействует периферийная часть пучка при облучении следующим импульсом. Плотность мощности в этой части постепенно снижается к краям светового пятна. Металл здесь нагревается до меньших температур, чем в центральной части пучка. Происходит отпуск ранее закаленной лазерным излучением поверхности, что приводит к уменьшению микротвердости материала. Распределение микротвердости вдоль направления перемещения пучка на поверхности образца из стали У8 показано на рис.5.

Упрочненный слой состоит из участков с микротвердостью $H_{100}=1000$ кг/мм², разделенных зонами с пониженной микротвердостью.

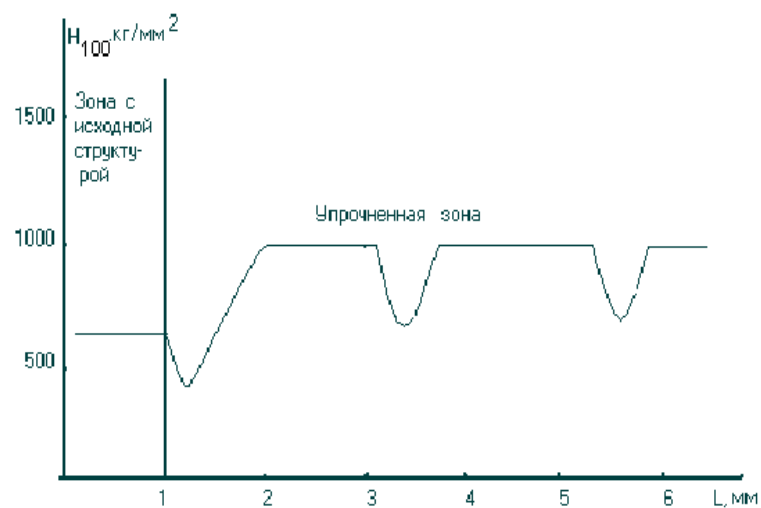


Рис.5 Распределение микротвердости вдоль направления перемещения пучка для стали У8.

Результаты экспериментальных исследований процесса термоупрочнения некоторых сталей приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сталь	Среда, в которой проводится обработка	Критическая энергия, Дж	Глубина закаленного слоя, мм	Микротвердость, Н ₁₀₀ , кг/мм ²	
				Исходная	После закалки
У8	Воздух	26	0,135	650	1000
У10	--	25	0,130	650	1000
ХВГ	--	26	0,130	650	1000
Х12М	--	24	0,110	590	1080
У8	аргон	31	0,120	650	1000
У10	--	30	0,115	650	1000
ХВГ	--	30	0,115	650	1000
Х12М	--	28	0,100	590	1080

Порядок выполнения работы.

1. Изучить устройство и принцип работы лазерной технологической установки, металлографического микроскопа, микротвердомера ПМТ-3 и методику изготовления микрошлифов.
2. Включить установку согласно инструкции по эксплуатации.
3. Провести термообработку образцов сталей У8, У10, и ХВГ на воздухе и в среде аргона.
4. Измерить микротвердость Н₁₀₀ кг/мм²: исходную и после закалки. Для измерения микротвердости установить образец на предметном столике прибора ПМТ-3, измерить длину диагонали отпечатка и определить микротвердость по таблице.
5. Определить глубину закаленного слоя.
6. Исследовать распределение микротвердости по глубине и поверхности образца.
7. Изготовить и сфотографировать микрошлиф для стали У8.
8. Составить отчет о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Физические основы лазерной термообработки металлов.
2. Оптическая схема лазерной установки .
3. Методика измерения микротвердости образца.
4. Методика изготовления микрошлифов.
5. Распределение микротвердости по глубине и поверхности закаленного слоя.

Литература.

1. В.С.Великих и др. Импульсная лазерная закалка технологического инструмента. –Электронная промышленность, 1976, №1, с. 64-67.
1. К.И. Крылов и др. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. –Л.: Машиностроение,1978, 335 с.
2. В.С. Коваленко Обработка материалов импульсным излучением лазеров. - Киев: Вища школа, 1977 г.,137 с.
3. Н.Н. Рыкалин и др. Лазерная обработка материалов. –М.: Машиностроение , 1975, 295 с.
4. А.И. Самохоцкий, М.Н. Кунявский Лабораторные работы по металловедению М.: Машгиз, 1959 г., с.21-31, с.109-121.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.

ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СТЕКЛА МЕТОДОМ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение процесса лазерного управляемого термораскалывания стекла, отработка технологических режимов резки стекла.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: CO_2 -лазер мощностью излучения 35 Вт, комбинированная сфероцилиндрическая линза

из $NaCl$, форсунка для подачи хладагента в зону обработки, координатный стол с плавной регулировкой скорости перемещения, измеритель мощности лазерного излучения, образцы стекла.

Теоретическое введение.

Процесс лазерного управляемого термораскалывания заключается в следующем. Если изделие из стекла перемещать относительно лазерного луча достаточной мощности, нагревающего поверхность стекла до температуры, превышающей предел термостойкости, но не больше температуры стеклования, то при определенных условиях на некотором расстоянии от луча в стекле возникает трещина, которая следует за лучом лазера. Лазерный луч как бы ведет за собой трещину, обеспечивая возможность вырезания изделий из стекла теоретически любой формы, хотя практически имеются ограничения. В процессе облучения стекла лазерным лучом прогревается очень тонкий поверхностный слой. В результате чего в поверхностном слое наводится большой градиент температуры, вызывающий значительные напряжения, превышающие предел прочности стекла. Слабая теплопроводность стекла обуславливает небольшую скорость распространения действия термонапряжений по сравнению с возможными скоростями перемещения лазерного луча вдоль поверхности стекла, и разрушения стекла происходит с некоторым запаздыванием. Появление трещины в стекле под воздействием лазерного излучения должно наступить в тот момент, когда температурный перепад в e раз устанавливается по всей толщине стекла, т.е.

$$\sqrt{4at} = h \quad (1)$$

Это значит, что через время t и при выполнении условия (1) практически по всей толщине стекло будет разогрето до температуры, превышающей предел термостойкости.

Пока стекло прогревается до такой степени, чтобы обеспечить условие (1), лазерный луч успевает уйти вперед на расстояние

$l = \mathcal{G} \cdot t$. Подставляя значение t из (1), получаем выражение для длины запаздывания начала трещины от неподвижной точки облучения поверхности стекла:

$$l = \frac{h^2 \mathcal{G}}{4 a} \quad (2)$$

Решая (2) относительно \mathcal{G} , получим выражение для скорости управляемого термораскалывания стекла:

$$\mathcal{G} = \frac{4 a l}{h^2} \quad (3)$$

Как следует из (3), скорость термораскалывания прямо пропорционально температуропроводности материала и обратно пропорционально квадрату его толщины.

С другой стороны, скорость \mathcal{G} определяется плотностью мощности лазерного излучения. Выражение для мощности лазерного излучения, необходимой для обеспечения управляемого термораскалывания стекла с заданной скоростью:

$$P = 2.85 T_c \sqrt{h^3 \lambda \rho c \mathcal{G}} \quad (4)$$

где T_c - температура стеклования, h - толщина материала, λ - коэффициент теплопроводности материала, ρ - плотность материала \mathcal{G} - скорость термораскалывания, c - удельная теплоемкость.

Таким образом, зная размеры и характеристики подлежащего обработке стекла, можно используя (3) и (4) рассчитать режим управляемого термораскалывания.

Большое значение при осуществлении управляемого термораскалывания имеет форма лазерного луча. Экспериментально установлено, что для качественного термораскалывания, кроме описанных ранее условий, необходимо также, чтобы форма лазерного луча на поверхности

стекла имела вид эллипса, вытянутого в направлении разделения. Диаметр лазерного луча должен примерно равняться толщине стекла.

Исследование процесса лазерного управляемого термораскалывания выполняют на установке (рис. 1).

На рис. 2 показана форма лазерного пучка 1 на поверхности стекла, а также зона воздействия хладагента 2, следующего за лазерным пятном.

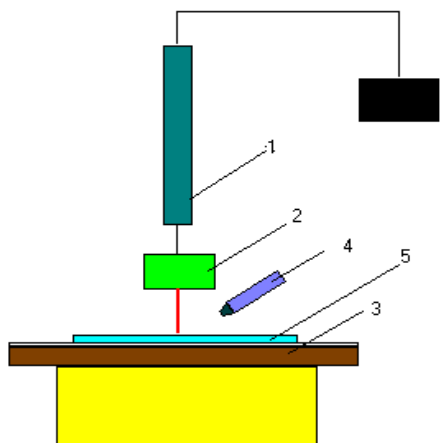


Рис.1 Установка лазерного термораскалывания стекла.

1 – CO₂-лазер с блоком питания; 2 - формирующая оптическая система; 3 - координатный стол с плавной регулировкой скорости перемещения относительно лазерного луча; 4 - форсунка для подачи хладагента в зону обработки стекла; 5 - образец из стекла для проведения исследований.

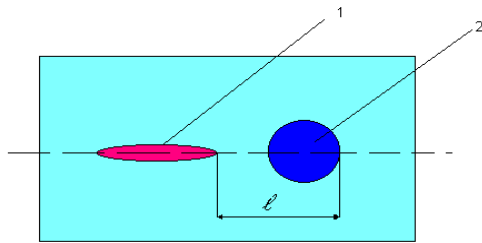


Рис.2 Форма лазерного пучка на поверхности стекла.

Порядок выполнения работы.

1. Подключить контур охлаждения для CO₂ - лазера. Включить блок питания лазера и установить ток 35 мА.
2. Рассчитать l , ϑ и P , зная, что h - заданная величина.
3. Зная теоретически рассчитанный режим управляемого термораскалывания для заданного образца из стекла, провести экспериментальные исследования процесса управляемого термораскалывания изменяя плотность мощности лазерного пучка и регулируя скорость перемещения координатного стола. Выполнить подобные операции для двух других заданных образцов стекла.
4. Результаты теоретического расчета, а также экспериментальных исследований занести в таблицу 1.

Таблица 1.

Режимы управляемого лазерного термораскалывания стекла.

вид материала	размеры образцов, мм		мощность лазерного луча, Вт		скорость перемещения, мм/с		отставание трещины
	толщина	поперечные размеры	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	

5. По данным таблицы 1 построить график зависимости величины отставания трещины от скорости перемещения образца.
6. Сравнить полученные экспериментально результаты с теоретическими.
7. Составить отчет о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Условия возникновения управляемой трещины в стекле под действием лазерного излучения.
2. В каких случаях наблюдаются искривления трещины?
3. Влияние формы пучка лазера на качество обработки.
4. Способы увеличения эффективности разделения методом лазерного управляемого термораскалывания.

Литература.

1. О. А. Мачулка. - Лазерная обработка стекла .- М.: Советское радио , 1979 .
2. В. И. Борода и др. Термораскалывание стеклянных трубок лазерным излучением. - Электронная промышленность, 1979, № 1, с.59-64.
3. Т. М. Бартенев. Механические свойства и тепловая обработка стекла. - М: Стройиздание,1960.
4. Е. К. Белоусов и др. - Управляемое термораскалывание стекла лазерным излучением диапазона 10,6 мкм. – Электронная промышленность, 1978, №9.

ЛАЗЕРНАЯ РАБОТА № 6.

ЛАЗЕРНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: исследование процессов лазерного скрайбирования диэлектрических материалов.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: лазер на алюмо-иттриевом гранате, работающий в режиме модулированной добротности резонатора, оптическая система для фокусировки лазерного пучка, измерительный микроскоп, координатный стол с ЧПУ, измеритель мощности, осциллограф.

Теоретическое введение.

При воздействии импульса сфокусированного лазерного излучения на обрабатываемую поверхность образуется лунка.

Вследствие относительного перемещения излучения или пластины лунки частично совмещаются, образуя сплошную риску на поверхности пластины, что уменьшает местную прочность материала. Снижение местной прочности при нанесении лазерной риски происходит под действием трех факторов: уменьшение площади поперечного сечения пластин, образования концентратора напряжения и изменения прочности слоя материала вблизи риски под действием лазерного излучения. Схема образования риски показана на рис. 1, где d - диаметр отдельной лунки, а t - расстояние между центрами соседних лунок. Ширина реза равна диаметру пятна излучения в фокальной плоскости, а скорость нанесения риски или скорость скрайбирования

$$V = t \cdot f \quad (1)$$

где f - частота следования импульсов.

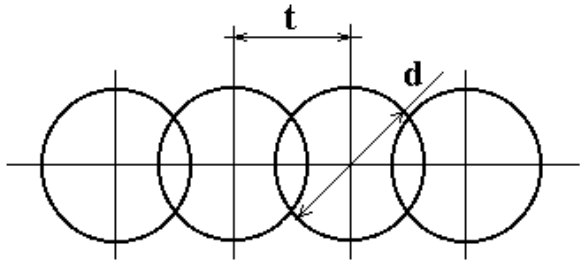


Рис. 1. Схема образования риски.

d - диаметр отдельной лунки; t - расстояние между центрами соседних лунок.

Характеристикой степени совмещения отдельных лунок является коэффициент наложения

$$K = (d - t) / d \quad (2)$$

отсюда скорость скрайбирования

$$V = f \cdot d \cdot (1 - K) \quad (3)$$

При $K > 0,5$ на точки, расположенные на линии центров отдельных лунок, воздействует больше одного импульса. Усредненное число импульсов, воздействующих на одну точку

$$n = 1 / (1 - K) \quad (4)$$

В случае одномодового режима генерации интенсивность излучения в пятне распределяется по закону Гаусса, а так как центр фокального пятна перемещается относительно фиксированной точки, то очевидно, что вклад каждого последующего импульса в увеличении глубины риски различен. Максимальный вклад вносит импульс, центр пятна которого

совпадает с данной точкой. На рис.2 представлен характерный график зависимости глубины скрайбирования от числа импульсов и коэффициента наложения: $h=F(n)=F(K)$. Эти экспериментальные зависимости, получены при постоянной средней мощности излучения лазера в непрерывном режиме, т.е. постоянной мощности накачки $P=2,6$ кВт.. Из рис.3 видно, что для каждого значения глубины риски h зависимость $V = F(f)$ имеет максимум. Это свидетельствует о том, что для скрайбирования на заданную глубину всегда можно определить частоту и коэффициент наложения, обеспечивающие максимальную скорость скрайбирования.

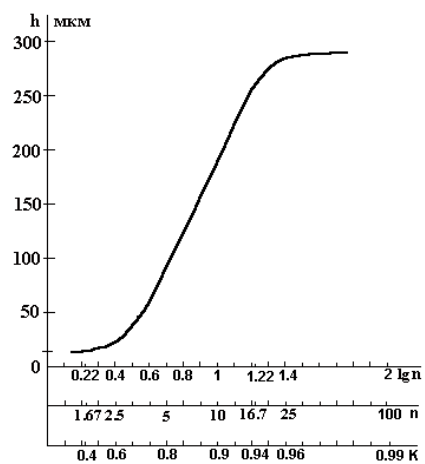


Рис.2. График зависимости глубины скрайбирования от числа импульсов и коэффициента наложения

Лазерное скрайбирование полупроводниковых пластин.

Скрайбирование пластин из кремния, арсенида галлия и других материалов для последующего разделения пластин на отдельные элементы по линии надреза позволяет увеличить выход годных изделий, что даст очень большую экономию. Увеличение производительности за счет большой скорости скрайбирования также значительно уменьшает стоимость продукции.

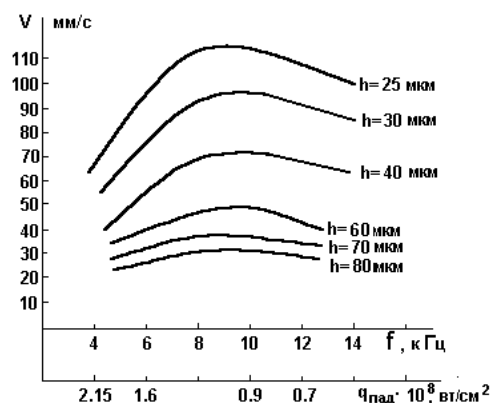


Рис.3. Зависимости скорости скрайбирования от частоты следования импульсов и плотности мощности лазерного излучения.

Для скрайбирования полупроводниковых пластин используют исключительно ИАГ-лазеры непрерывного действия с модуляцией добротности (длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм, продолжительность импульса лазерного излучения 0,15 - 0,3 мкс, частота следования импульсов 1-40 кГц, средняя мощность последовательности импульсов 0,5-16 Вт при мощности в импульсе 1-20 кВт). При этом глубина надреза, выполненной пучком сфокусированного лазерного излучения, составляет 40 - 125 мкм, а ширина 20-40 мкм при толщине пластины 150-300 мкм. Скорость скрайбирования обычно 10-15 см/с. Возможно также полное разделение пластины.

Большая плотность мощности $10^8 \div 10^9$ Вт/см² вызывает плавление и кремния и арсенида галлия (температура в месте воздействия сфокусированного лазерного пучка при скрайбировании составляет 2000 °С). Очень малая продолжительность лазерного импульса и быстрое перемещение разрезаемой пластины (относительно сфокусированного лазерного пучка) является причиной того, что тепло,

выделяющееся в прилегающую к надрезу область материала полупроводника, не вызывает существенных изменений в нем. Зона термического воздействия в прилегающем к надрезу слое полупроводника вообще не более 50 мкм.

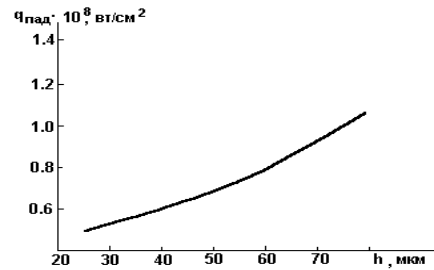


Рис.4 Зависимость оптимальной плотности мощности лазерного излучения для скрайбирования на заданную глубину.

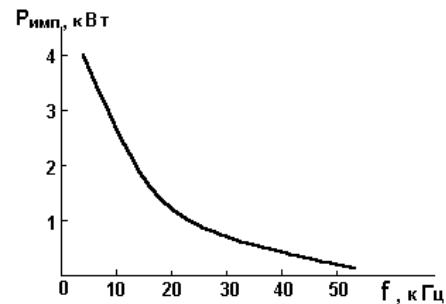


Рис.5. Зависимость мощности лазерного излучения от частоты следования импульсов.

Во время скрайбирования лазером часть удаляемого полупроводника может оседать около надреза на поверхности пластины. Эти загрязнения можно удалить, например, поместив надрезанные пластины в ультразвуковую ванну. Кроме того, разработаны специальные предохраняющие покрытия, которые наносят на поверхность пластины перед скрайбированием и

удаляют после него. Чтобы избежать загрязнения поверхности со структурами, применяют скрайбирование во избежание повреждения структур при разламывании.

Лазерное скрайбирование керамических пластин.

Скрайбирование керамических пластин с нанесенными структурами или без структур производят для деления их на модули вдоль линии надреза. Для лазерного скрайбирования пластин из электрокорундовой или бериллиевой керамики применяют CO_2 или ИАГ-лазеры, работающие в импульсном режиме с большей частотой следования импульсов.

Скрайбирование с применением CO_2 -лазера заключается в выполнении вдоль линии раздела пластины ряда несквозных отверстий диаметром 75-200 мкм и глубиной 100-200 мкм на расстоянии друг от друга 75-200 мкм, при этом средняя мощность пучка излучения CO_2 -лазера 20-50 Вт и мощность в импульсе 40-150 Вт. Продолжительность импульсов 0,1 - 5 мс, а частота повторения от 100 Гц до 1 кГц. Излучение с длиной волны $\lambda=10,6$ мкм (CO_2 -лазер) лучше поглощается керамикой, чем излучение с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм (ИАГ-лазеры), что говорит в пользу применения CO_2 -лазеров. Однако неодимовые и ИАГ-лазеры испускают излучение, которое можно сфокусировать (длина волны в 10 раз меньше), что при большей мощности лазерных импульсов (до 40 кВт) и большей их частоте (до 40-50 кГц) также обеспечивает хорошие результаты скрайбирования. И еще одним очень важным преимуществом обладают неодимовые и ИАГ-лазеры - возможность использования стеклянных фокусирующих объективов.

При использовании ИАГ-лазеров для скрайбирования керамических пластин получается непрерывный надрез; возможно даже полное разделение пластины из-за большой частоты и большой мощности лазерных импульсов.

Кроме керамики, возможно надрезать методом лазерного скрайбирования пластины из сапфира, стекла и др. диэлектрических материалов.

Исследование процесса лазерного скрайбирования выполняют на установке, содержащей лазер на ИАГ, средняя мощность излучения 5-10 Вт, частота следования импульсов 1-50 кГц, максимальная импульсная мощность 3-10 кВт при длительности импульса 100-600 нс.

Порядок выполнения работы.

1. Включить, лазерную технологическую установку согласно техническому описанию.
2. Для скрайбирования образцов из керамики толщиной 0,5 и 1,0 мм из графика зависимости оптимальной плотности мощности $q_{\text{пад. опт}} = F(h)$ приведенного на рис.4, определить значение $q_{\text{пад.}}$, необходимое для скрайбирования на заданную глубину h .
3. Импульсную мощность излучения найти из соотношения
$$P_{\text{имп}} = q_{\text{пад. опт}} \cdot \pi d^2 / 4 \text{ Вт.}$$
4. Из графика зависимости $P_{\text{имп}} = F(f)$, приведенного на рис. 5, определить частоту следования импульсов излучения.
5. Оптимальное значение коэффициента наложения определяется из графика зависимости $K = F(h)$, приведенного на рис.5.
6. Значение скорости скрайбирования определяется из выражения
$$V = d \cdot f \cdot (1-K) \text{ см/с.}$$
7. Провести экспериментальные исследования процесса лазерного скрайбирования для керамики толщиной 0,5 и 1,0 мм.
8. Результаты эксперимента по лазерному скрайбированию керамики занести в табл. 1.
9. Составить отчет о проделанной работе.

Таблица 1.

Режимы лазерного скрайбирования керамических пластин.

Вид материала	Толщина, мм	Скорость скрайбирования см/с.	Частота следования импульсов, кГц.	Средняя мощность лазерного пучка, Вт

Контрольные вопросы.

1. Метод лазерного скрайбирования. Преимущества по сравнению с другими методами резки металлов.
2. Лазерное скрайбирование полупроводниковых материалов и керамики.
3. Зависимость скорости и глубины скрайбирования от частоты следования импульсов и мощности лазерного излучения.
4. Скрайбирование диэлектрических материалов с применением CO₂ - лазера и лазера на ИАГ.
5. Недостатки лазерного скрайбирования.

Литература.

1. К.Ц. Браславский и др. Выбор оптимальных режимов лазерного скрайбирования. - Электронная промышленность, 1976, №1, с.31-34.
2. Б.С. Борисов и др. Исследование напряжений, возникающих в кремнии при скрайбировании. - "Электронная техника", сер. 6, 1970, вып.4.
3. Г.А. Мачулка Лазерная обработка стекла. - М.: Советское радио, 1979.
4. Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф. Стельмаха - М.:Энергия,4, 1975.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.

ПРОШИВКА ОТВЕРСТИЙ В МАТЕРИАЛАХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение процессов лазерной прошивки отверстий в материалах, проведение экспериментальных исследований прошивки отверстий в нержавеющей стали.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: лазерная технологическая установка, инструментальный микроскоп, измеритель энергии ИКТ-1Н, осциллограф, образцы.

Теоретическое введение.

Основными процессами, приводящими к образованию отверстий в материалах с использованием лазерного излучения, являются испарения и плавления вещества. По глубине отверстие растет за счет испарения, а по диаметру - за счет плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров.

При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью материала часть излучения поглощается и рассеивается продуктами разрушения. Наиболее существенное влияние на поглощение излучения в факеле оказывает паровая фаза продуктов разрушения, представляющая собой низкотемпературную слабоионизированную плазму, прозрачность которой определяется ее температурой и концентрацией. Экспериментально доказано, что поглощение излучения в плазме начинает иметь наиболее существенное значение при плотностях потоков излучения $g \geq 10^8 \div 10^9 \text{ Вт/см}^2$. Эта величина ограничивает сверху диапазон рабочих плотностей потоков излучения, используемых для получения отверстий в материалах.

Нижняя граница определяется плотностью потока, при которой процесс образования лунки начинается в момент

окончания импульса, т.е. примерно соответствует порогу начала разрушения материалов (металлов) $g = 10^5 \div 10^6 \text{ Вт/см}^3$.

Выбор технологических режимов при прошивке отверстий лазерным лучом основывается на учете свойств обрабатываемого материала: коэффициент поглощения и отражательная способность при данной длине волны лазерного излучения, определяющие процесс поглощения энергии; удельная теплопроводность и температуропроводность, определяющие тепловой поток в материале; плотность, удельная теплоемкость, скрытая теплота и температура фазового перехода, определяющие энергоемкость процесса перехода материала в новое фазовое состояние. При выборе режимов необходимо учитывать влияние энергетических и временных характеристик лазерного излучения. Многие технологические лазерные установки имеют одну неизменную продолжительность импульса. В таком случае получение заданных размеров отверстия достигается подбором нужного значения энергии импульса и зависимость глубины и диаметра полученного отверстия от энергии является одной из основных характеристик, определяющих возможности лазерной обработки. Величину энергии можно менять путем изменения электрической энергии импульсных ламп, применение светофильтров, диафрагмированием луча. При этом надо отметить, что когда энергия изменяется накачкой или диафрагмированием луча, диаметры полученных отверстий меньше, чем диаметры отверстий, получаемых при изменении энергии светофильтрами.

Уменьшение диаметра при диафрагмировании луча объясняется уменьшением его расходимости, а в случае изменения энергии - уровнем накачки активного элемента, уменьшением, как расходимости луча, так и длительности излучения. Диафрагмирование луча при постоянной накачке активного элемента приводит к особенности: если диаметр отверстий связан с диаметром диафрагмы, то глубина отверстий меняется весьма слабо при изменении диафрагмы в широких пределах.

Неизменность глубины отверстия при диафрагмировании луча объясняется тем, что диафрагма не меняет распределения

плотности потока в поперечном сечении луча, изменяя лишь общую расходимость и диаметр луча. Поскольку скорость роста лунки в глубину определяется плотностью мощности потока, то глубина отверстия не должна существенно изменяться при диафрагмировании луча.

Экспериментальные исследования показывают, что размеры отверстий зависят определенным образом и от длительности импульса лазерного излучения.

Изменение длительности импульса с 0,25 до 0,85 мс при неизменной энергии накачки приводит к увеличению глубины отверстия в 1,5 раза с одновременным уменьшением диаметра на 30%. Зависимость глубины и диаметра получаемого отверстия от длительности импульса можно объяснить двумя факторами. Первый - распределение интенсивности излучения в поперечном сечении луча - падает от своего максимального значения в центре луча к периферийным участкам его сечения. Вторым фактором - уменьшение экранирующего влияния продуктов разрушения материала при уменьшении плотности светового потока, когда длительность импульса увеличивается. Это объясняется увеличением доли жидкой фазы, которая остается на стенках отверстия и не может быть вытеснена из лунки из-за снижения давления паров и, таким образом, практически не участвует в экранировании излучения.

Важным фактором в образовании наплывов расплава по стенкам отверстия является наличие у импульса излучения пологого заднего фронта. Опыты, проведенные с отсечкой заднего фронта импульса, показывают, что при этом микрорельеф поверхности отверстия становится более ровным, практически без наплывов расплавленного металла, хотя глубина отверстия изменяется незначительно (15% при отсечке заднего фронта длительностью 300 мкс).

Согласно феноменологической модели, строгий анализ роста лунки при плавлении стенок требует решение гидродинамической задачи при движении пара и вязкой жидкости вдоль стенок, с учетом всех факторов их нагрева. Будем рассматривать упрощенную модель, согласно которой при фокусировке излучения вблизи передней поверхности материала

образуется лунка, профиль которой близок к цилиндрическому (рис.1). Изменение размеров лунки со временем происходит так, что в первом приближении текущий радиус $r(t)$ и глубина $h(t)$ связаны между собой правлением светового конуса для крайних лучей пучка с углом раствора 2φ , т.е.

$$r(t) = r_0 + h(t) \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

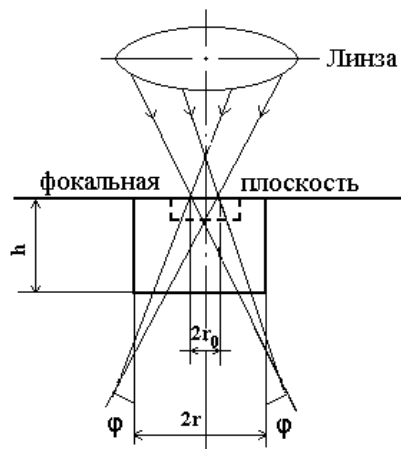


Рис.1 Изменение глубины h и радиуса r лунки во времени.

При построении феноменологической модели, пренебрегается также температурная зависимость полной теплоты испарения материала и экранировкой поверхности испарения продуктами разрушения.

Согласно феноменологической теории, если излучение лазера фокусируется на поверхность материала, то к моменту окончания действия импульса образуется отверстие глубиной

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\operatorname{tg} \varphi}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot L_0} - \frac{r_0}{\operatorname{tg} \varphi}} \quad (2)$$

и диаметром

$$d = 2\sqrt{r_0^3 + \frac{3E \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\pi \cdot L_0}} \quad (3)$$

где $E = P\tau$ - энергия излучения в импульсе; P - импульсная мощность; r_0 -начальный радиус лунки, равный радиусу светового пятна; φ - половинный угол раствора светового пятна; L_0 - удельная скрытая теплота испарения вещества.

Таким образом, определяющим фактором, влияющим на соотношение глубины и диаметра отверстия, является величина $\operatorname{tg} \varphi$, характеризующая угол светового конуса, после фокальной плоскости оптической системы. Чем меньше $\operatorname{tg} \varphi$, тем больше отношение глубины к диаметру отверстия. Поэтому для получения глубоких узких отверстий оптимальным является случай, когда $\operatorname{tg} \varphi = 0$, при этом:

$$h = \frac{E}{\pi \cdot r_0 L_0}; d = 2r_0; \frac{h}{d} = \frac{E}{2\pi \cdot r_0 L_0} \quad (4)$$

Соотношения (4) описывают процесс роста отверстия внутри цилиндрической световой трубки, в которую вырождается световой конус ($\operatorname{tg} \varphi = 0$).

Если $\operatorname{tg} \varphi \neq 0$, то расфокусировка лазерного пучка приводит к уменьшению плотности энергии в его нижней части.

Следствием этого является существование предельных размеров следствия, образующегося в материале под действием неограниченного числа световых импульсов с заданной энергией E :

$$d_{\text{удел.}} \approx 2\sqrt{\frac{\dot{I}}{\pi \cdot Q}}; h_{\text{удел.}} \approx \frac{\sqrt{\frac{\dot{I}}{\pi \cdot Q} - r_0}}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (5)$$

где Q - пороговая плотность энергии, соответствующая установлению процесса квазистационарного испарения к концу импульса.

На профиль отверстия и на его размеры существенное влияние оказывают условия фокусирования лазерного излучения, под которым понимаются фокусное расстояние фокусирующей системы и смещение фокальной ее плоскости относительно поверхности обрабатываемой детали. На рис.2 приведены профили отверстий, полученные в материале при одной и той же энергии излучения, но при различных положениях фокуса относительно поверхности обрабатываемой детали.

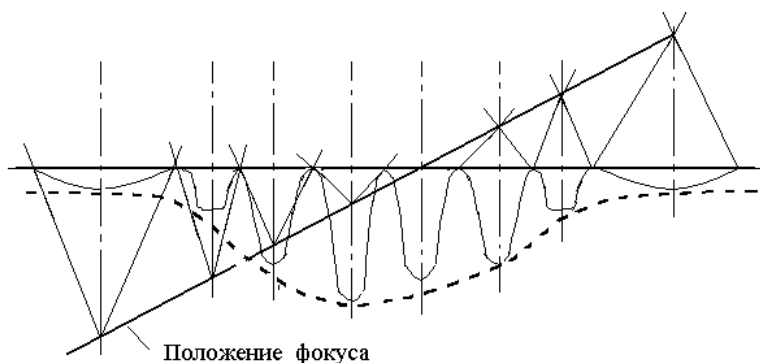


Рис.2 Изменение профиля отверстия при различных положениях фокуса относительно поверхности материала.

Из рис.2 видно, что в сходящемся лазерном пучке характерным является конический профиль отверстия, при этом стенки его практически не поглощают световой поток, распространяющийся вдоль них, и механизм разрушения представляет в этом случае испарение материала за счет теплопроводности. При облучении в расходящемся лазерном пучке достаточной плотности энергии, происходит интенсивное плавление стенок и, хотя общее количество удаляемого вещества при этом несколько возрастает за счет жидкой фазы, глубина отверстия уменьшается из-за расфокусировки луча. Рассмотрим

условия получения отверстий максимальной глубины за один импульс с заданной энергией и длительностью импульса лазерного пучка.

Из опытных наблюдений известно, что для получения отверстий максимальной глубины требуется сфокусировать световой пучок на расстоянии h от поверхности внутри материала.

Расчет величины l_0 производится в предположении, что до фокуса оптической системы отверстие повторяет форму и размеры светового конуса и механизмом его образования является испарение. В результате получим:

$$l_0 = \frac{r_0}{\beta} \left[\sqrt[3]{1 + \frac{3E\beta \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\pi \cdot L_0 \cdot r_0^3 (\beta + \operatorname{tg} \varphi)}} - 1 \right] \quad (6)$$

$$h_{\max} = l_0 \frac{\beta + \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (7)$$

где $\beta = \frac{D + 2\alpha \cdot l}{2f}$, D - диаметр светового пучка на выходном

зеркале лазера; 2α - угол расходимости излучения; l - расстояние от лазера до переднего фокуса линзы с фокусным расстоянием f .

На практике очень важно по заданным размерам отверстия h и d рассчитать энергию E , длительность импульса τ , размер пятна сфокусированного лазерного излучения. Для решения этой задачи необходимо учитывать характер связи глубины с диаметром отверстия, согласно уравнению светового конуса $d = d_0 + 2h \operatorname{tg} \varphi$.

Для получения большей точности в определении диаметра можно воспользоваться простым соотношением между объемом удаленного из цилиндрического отверстия вещества и затраченной энергией излучения:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} h L_p = E \quad (8)$$

где L_p - удельная энергия разрушения единицы объема вещества, определяемая экспериментально.

Формулы (2) и (8) при известных оптических и теплофизических характеристиках материала могут быть использованы для расчета параметров светового импульса h и d .

С помощью этих формул, можно определить энергию и фокусное расстояние линзы, а остальные параметры импульса: длительность τ , угол расходимости излучения 2α и расстояние между лазером и передним фокусом линзы, могут быть выбраны такими, какими обладает каждый конкретный лазер. Поэтому величины τ , α и l будем считать известными. Тогда величины E и f могут быть определены так

$$E = \pi L_p r^2 h \quad (9)$$

$$f = \left\{ \frac{3(r^2 \varepsilon - \alpha \cdot h \cdot S) + \left[9(r^2 \varepsilon - \alpha \cdot h \cdot S)^2 - 12\alpha^2 \cdot S^2 h^2 \right]^{1/2}}{6\alpha^2} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

$$\text{где } r = \frac{d}{2}; S = \frac{D - 2\alpha \cdot l}{2}; \varepsilon = \frac{L_p}{L_0}$$

Экспериментальные исследования по прошивке отверстий в данной работе проводятся на лазерной технологической установке оптическая схема которой приведена на (рис.3).

Порядок выполнения работы.

1. Изучить устройство и принцип работы лазерной технологической установки.
1. По формулам (9) и (10) рассчитать величину энергии излучения лазера E и величину фокусного расстояния объектива f для прошивки отверстий в нержавеющей стали

$h=1\text{мм}$ и диаметром $0,3\text{мм}$. ($D=6,3\text{ мм}$, $l=50\text{ мм}$, $2\alpha=3\times 10^{-3}\text{ рад}$, $\tau=1,5\text{ мс}$.)

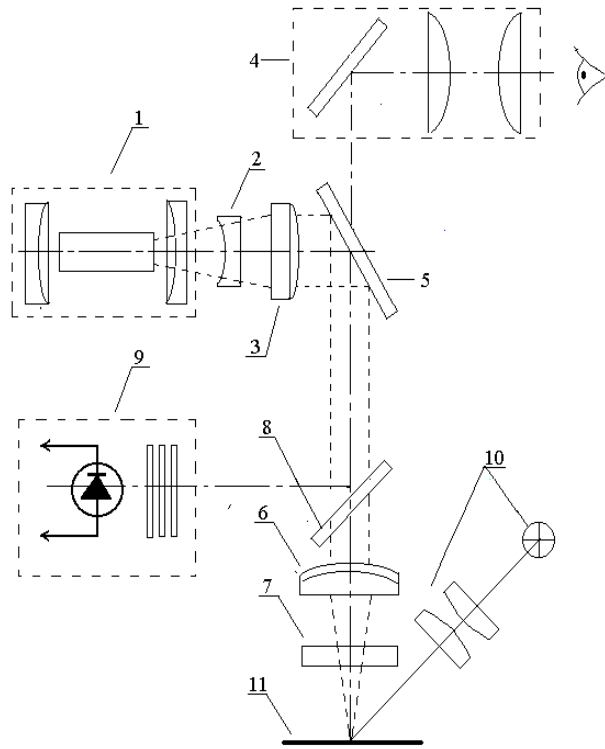


Рис.3 Оптическая схема лазерной технологической установки для прошивки отверстий в материалах.

1- источник лазерного излучения; 2,3 - телескопическая система; 4- визуальный канал; 5- поворотное зеркало; 6- оптическая система для фокусировки лазерного излучения; 7- защитная пластинка; 8,9- устройство для контроля энергии лазерного пучка; 10- подсветка; 11- образец для прошивки отверстий.

3. Провести исследование зависимости формы продольного сечения отверстий от положения фокуса лазерного пучка относительно поверхности обрабатываемой детали.
4. Экспериментально исследовать зависимость размеров получаемых отверстий при различных значениях энергии излучения лазера.
5. Составить отчет о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Влияние свойств материала на выбор технологических режимов при прошивке отверстий лазерным излучением.
2. Зависимость размеров получаемых отверстий от энергетических и временных характеристик лазерного излучения.
3. Зависимость формы отверстий при одной и той же энергии, но при различных положениях фокуса объектива относительно поверхности образца.
4. Методика расчета параметров лазерного импульса с целью получения цилиндрического отверстия с размерами h и d при известных оптических и теплофизических характеристиках материала.
5. Оптическая схема лазерной установки.

Литература

1. К.И. Крылов, В.Т. Прокопенко Применение лазеров в машиностроении, приборостроении –Л. Машиностроение, 1978 г.
2. К.М. Банас Лазерная обработка материалов. –ТИИЭР,1982, т.70 №6.с.35-45.
3. Лазеры в технологии. / Под редакцией М.Ф.Стельмаха. –М: Энергия , 1975 г.
4. Л.А. Вивер Применение лазеров для различной обработки и сварки. –В сб.: Применение лазеров. –М. Мир,1974 г.

5. А.А. Углов , А.А. Гнедовец К оценке уменьшения интенсивности лазерного излучения плазмой вблизи поверхности твердых мишеней. –Физика и химия обработки материалов, 1979,№5, с.3-11.
5. Т.Н.Соколова, Л.А.Сурменко. Лазерная размерная обработка материалов, применение в электронной технике. 1986 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.

ЛАЗЕРНАЯ ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение процесса лазерной точечной сварки металлов для различных типов соединений.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: лазерная установка «Квант-12», металлографический микроскоп, образцы для сварки, измеритель энергии ИКТ-1Н, осциллограф, фотодиод ФД-24К, шлифовальные и полировальные порошки, реактив для травления.

Теоретическое введение.

При взаимодействии с поглощающей средой световой поток частично отражается от поверхности, а частично проникает внутрь материала, поглощаясь в нем. Изменение плотности светового потока q , т.е. количества световой энергии, приходящейся на единицу поверхности материала в единицу времени, в поглощающей среде описывается законом Бугера - Ламберта.

$$q(x) = q_0 A \exp\left(-\int_0^x \alpha(x) dx\right) \quad (1)$$

где q_0 - плотность падающего светового потока на поверхности

материала: A - поглощательная способность материала; $A = 1 - R$ (R - коэффициент отражения); $\alpha(x)$ - коэффициент поглощения света в среде.

Координата x отсчитывается от поверхности вглубь материала. Формула (1) соответствует случаю нормального скин-эффекта. Она применима к самым различным материалам. Конкретные значения входящих в неё величин A и α , а также механизмы поглощения света и перехода его в тепло могут при этом сильно отличаться для различных материалов. В металлах кванты света поглощаются в основном электронами проводимости, которые рассеивают поглощенную энергию на тепловых колебаниях решетки за время $\tau_{ei} \approx 10^{-11} \div 10^{-10}$ сек.

Этот процесс протекает в слое толщиной $\delta \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$ см.

Пространственное распределение поглощенного светового потока в металле для оптических частот соответствует закону Бугера – Ламберта (1). Это обусловлено тем, что для оптических частот путь, проходимый электроном в металле за один период колебания поля, значительно меньше глубины проникновения излучения $\delta = 1/\alpha$, в результате чего выполняется закон Ома и скин-эффект является нормальным.

При этом $\alpha(x) = \alpha = \text{const}$

$$q(x) = q_0 A \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

а значение величин α и A определяются выражениями

$$\alpha \approx \frac{4}{c_0} \sqrt{\frac{\pi \cdot n_0 l_0^2}{m_0^*}} \quad (3)$$

$$A \approx \sqrt{\frac{m_0^*}{\pi \cdot n_0 l_0^2}} v' \quad (4)$$

где l_0 и m_0^* - заряд и эффективная масса электрона;

n_0 - концентрация свободных электронов в металле;

ν' - частота столкновения электронов, при которых происходит изменение импульса; c_0 - скорость света в вакууме.

Для большинства металлов в оптическом диапазоне длин волн характерны высокая отражательная способность $R=1-A$ (от 70% до 95%) и большой коэффициент поглощения $\alpha \approx 10^5 \div 10^6 \text{ см}^{-1}$. Высокая плотность мощности на поверхности свариваемых деталей, обеспечиваемая лазерными источниками излучения, обуславливает высокий темп нагрева, что облегчает сварку металлов, обладающих большой теплопроводностью (медь, серебро) и высокой температурой плавления (вольфрам, тантал, молибден). При сварке металлов световое пятно, получаемое на поверхности свариваемых деталей при фокусировке излучения, является поверхностным источником нагрева, так как излучение поглощается тонким поверхностным слоем толщиной в несколько сотых долей микрона. При плотностях мощности $10^5 \div 10^6 \text{ Вт/см}^2$ и длительности порядка $10^{-3} \div 10^{-2}$ сек передача тепла в глубину свариваемых материалов осуществляется в основном за счет теплопроводности.

Стадии развития процессов проплавления при различных плотностях мощности излучения показаны на рис. 1. Зона проплавления в этом случае имеет форму близкую к сферической.

Практически при лазерной сварке в большинстве случаев наблюдается интенсивное испарение металла. Это приводит к тому, что под давлением пара поверхность сварочной ванны прогибается. Участок этой поверхности непосредственно воспринимающий энергию излучения, опускается (рис. 1б).

Если при этом поверхностное натяжение расплавленного металла еще препятствует его выплеску, то после окончания действия излучения еще не застывший металл заполняет образовавшееся углубление. В результате прогиба сварочной ванны глубина проплавления увеличивается по сравнению с нагревом без заметного испарения. Форма зоны проплавления становится конической (рис. 1 б,в).

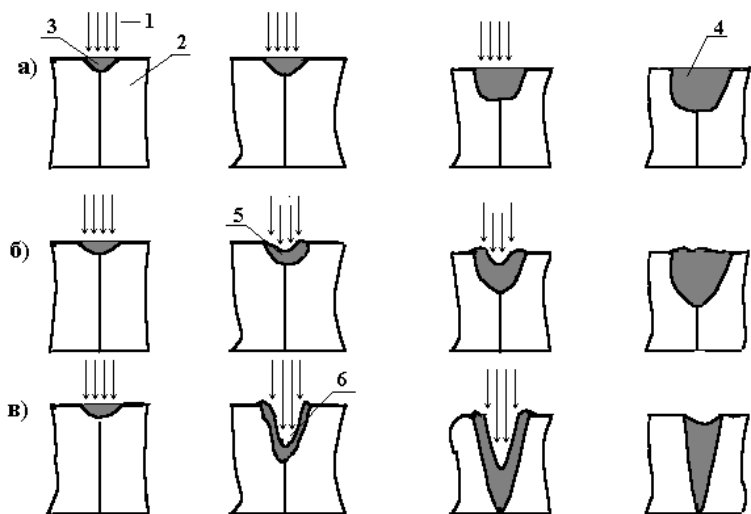


Рис. 1 . Стадии развития процессов проплавления при различных плотностях мощности излучения.

а) - проплавление за счет теплопроводности, $q=10^5 \div 10^6$ Вт/см²

б) - прогиб сварочной ванны, $q=5 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^6$ Вт/см²

в) - глубокое проплавление, $q=10^6 \div 10^7$ Вт/см²

1 - излучение лазера; 2 - свариваемые детали; 3 - расплавленный металл; 4 - застывшая сварочная ванна; 5 - объем заглубления; 6 - временное отверстие, полученное за счет испарения.

Увеличению глубины проплавления при интенсивном испарении с поверхности сварочной ванны способствует перемешивание верхних, нагретых до наибольшей температуры, и нижних, более холодных слоев расплавленного металла, которое возникает из-за неравномерного нагрева в пределах светового пятна. При увеличении плотности мощности в центре светового пятна до величины порядка $5 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^7$ Вт/см² в сварочной ванне образуется узкое глубокое отверстие, металл из которого

частично испаряется, частично вытесняется к периферии ванны (рис.1в). После окончания действия импульса временное отверстие заполняется металлом, расплавленным в периферийной зоне светового пятна, где плотность мощности была недостаточно для интенсивного испарения. Увеличению эффекта глубокого проплавления способствует пиковая структура импульсных твердотельных лазеров, так как за время действия одного пика плотность мощности в центре светового пятна может достигать $10^7 \div 10^8$ Вт/см. Изменение энергетических характеристик лазерного излучения позволяет осуществлять сварку пользуясь различными механизмами проплавления, выбор которых зависит от свойств свариваемых материалов и характера соединения.

При воздействии светового потока на поверхность свариваемых деталей часть его отражается. Для всех металлов коэффициент отражения увеличивается с увеличением длины волны света. В таблице 1 приведены коэффициенты отражения некоторых металлов.

В процессе нагрева поглощательная способность многих металлов заметно увеличивается с ростом температуры. Например, у серебра и меди при воздействии излучения с длиной волн 1,06 мкм она увеличивается примерно в два раза при нагреве от комнатной температуры до температуры плавления. В то же время у стали изменение оптических характеристик в том же интервале температур невелико.

На рис.2 показаны зависимости глубины и диаметра зоны проплавления некоторых металлов, от энергии излучения лазера на стекле с неодимом (при постоянных длительности импульса и диаметре светового пятна).

Следует отметить, что увеличение длительности лазерного импульса способствует более полному удалению из сварочной ванны нерастворенных газов и уменьшает возможность образования пористости после застывания металла. Наиболее благоприятной формой импульса излучения при сварке является трапециидальная или треугольная с относительно крутым передним и пологим задним фронтом.

Таблица 1.
**Коэффициенты отражения некоторых металлов для
 излучения с различной длиной волн.**

Металл	Длина волны, мкм		
	0.7	1.06	10.6
Алюминий	0.87	0.93	0.97
Хром	0.56	0.58	0.93
Медь	0.82	0.91	0.98
Никель	0.68	0.75	0.95
Серебро	0.95	0.97	0.99
Сталь	0.58	0.63	0.93-0.95

(а)

(б)

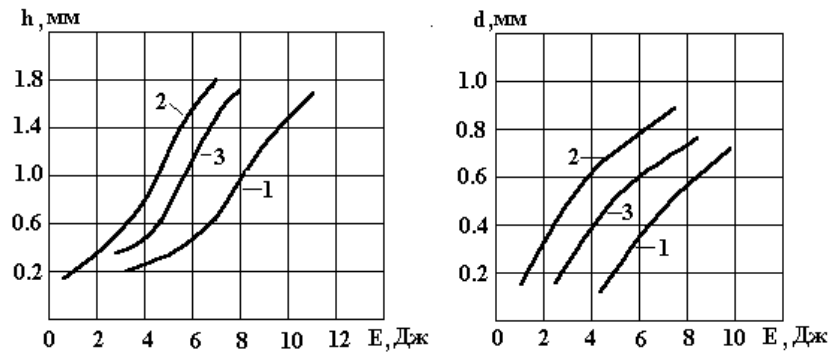


Рис.2. Зависимость глубины (а) и диаметра (б) зоны проплавления от энергии излучения.

Длительность импульса 4 мсек; диаметр светового пятна 0,5 мм.
 1 - медь; 2 - никель; 3 - молибден.

В течение первой части импульса проплавляется основная часть металла, реализуется режим глубокого проплавления. За время относительно медленного спада интенсивности во второй части импульса увеличивается количество жидкой фазы за счет плавления металла у краев сварочной ванны.

Затягивание заднего фронта импульса способствует заполнению углубления. На рисунке 3. представлены основные типы соединений.

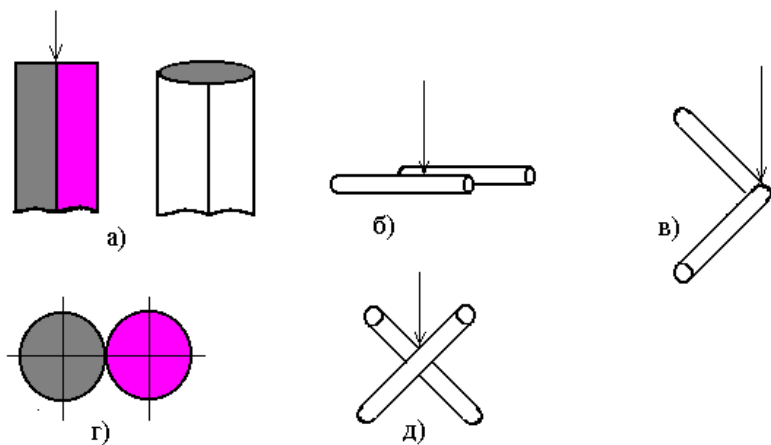


Рис. 3. Типы соединений

а - встык; б - внахлест; в - угловое соединение; г - схема светоловушка; д - соединение скрещивающихся проволок. Стрелками показано направление падения лазерного пучка.

Указанные на рис. 3 типы соединений можно выполнить с помощью установки, содержащей лазер на стекле активированном ионами неодима Nd^{+3} . Оптическая схема показана на рис.4.

Основные параметры.

Длина волны излучения $\lambda=1,06$ мкм.

Энергия в импульсе $E= 5 \div 30$ Дж

Длительность импульса $\tau = 4 \div 7$ мсек.

Расходимость излучения 17 мрад.

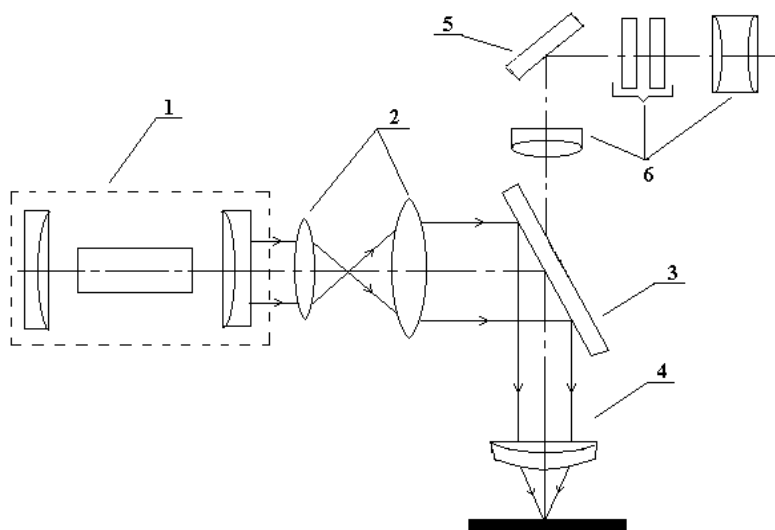


Рис.4. Оптическая схема установки для лазерной сварки
 1 - лазер на неодимовом стекле; 4 - фокусирующий объектив; 2 - телескопическая система; 5 - зеркало; 3 - поворотное интерференционное зеркало; 6 - система визуального наблюдения.

Порядок выполнения работы.

1. Изучить физические основы сварки металлов лазерным излучением.
2. Провести лазерную точечную сварку двух металлов при соединении их встык и внахлестку. Выбрать оптимальные режимы сварки ковара.
3. Проанализировать стадии развития процессов проплавления при различных плотностях мощности излучения.

4. Определить глубину проплавления.
5. Изготовить и зафотографировать шлиф нахлесточного соединения.
6. Составить отчет о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Особенности лазерного излучения как источника нагрева при сварке.
2. Влияние характеристик излучения на результаты сварки.
3. Схема образования сварочной ванны.
4. Основные типы сварных соединений лазерным пучком.
5. Отражательная и поглощательная способность лазерного излучения некоторых металлов.

Литература.

1. В.В.Андреев. Применение установки "Квант - 10" для сварки электровакуумных приборов. Электронная промышленность, 1976, №1, с. 41-45.
2. К.И.Крылов и др. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. - Л.: Машиностроение, 1978, 335 с.
3. Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф. Стельмаха - Энергия, 1975, с. 82-102.
4. Справочник по лазерной технике. Под ред. Ю.В. Байбородина и др. - Киев. Техника, 1978, 285 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9.

ГАЗОЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение технологических особенностей процессов газолазерной резки металлов, при использовании лазера работающего в непрерывном режиме.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: лазер на алюмо-иттриевом гранате, оптическая система СОК-1, координатный стол с ЧПУ, инструментальный микроскоп, измеритель мощности лазерного излучения.

Теоретическое введение.

К числу наиболее перспективных процессов разделения материалов следует отнести газолазерную резку металлов, основанную на процессах нагрева, плавления, испарения, химических реакциях горения - удаления расплава из зоны реза. При газолазерной резке в зону обработки совместно с лазерным лучом подается струя газа, способствующая удалению продуктов разрушения и инициирующая химическую реакцию в месте воздействия излучения на материал. Для этого используется кислород, сжатый воздух, инертный или нейтральный газы.

При газолазерной резке в зависимости от свойств обрабатываемого материала и рода поддуваемого газа различают два механизма: химический и физический.

Химический механизм характеризуется существенным вкладом энергии реакции горения в общий тепловой баланс и наблюдается в основном при лазерной резке в струе кислорода, металлов образующих жидкотекучие окислы. При реализации химического механизма резки возможны два режима: управляемой резки, когда тепло реакции горения только лишь дополняет эффект воздействия лазерного излучения и неуправляемой (автогенной) резки, когда металл горит за счет тепла реакции горения по всему диаметру струи, а лазерная энергия служит лишь для инициирования этой реакции. Физический механизм заключается в плавлении металла лазерным излучением и удалении расплава из зоны резки струей газа. Такой механизм наблюдается обычно при обработке металлов с малым тепловым эффектом реакции горения или металлов, образующих при горении тугоплавкие окислы, а также при использовании в качестве поддуваемых - инертные газы.

При газолазерной резке металлов в струе кислорода, последний способствует росту окисной пленки на поверхности

металла и в результате снижения его отражательной способности.

Выделяющееся в результате экзотермической реакции горения металла в кислороде тепло, идет совместно с лазерным излучением на разрушение металла в зоне обработки. Струя уносит продукты разрушения, обеспечивая приток кислорода непосредственно к фронту горения, а также препятствует чрезмерному нагреванию материала детали. Для не воспламеняющихся материалов, газовая струя выполняет в основном функции по очистке зоны резания, а также выполняет функцию защиты поверхности оптической системы от попадания на нее продуктов выброса из зоны реза. Необходимо отметить, что для металлических материалов коэффициент отражения излучения оказывается достаточно большим. Обработка металлов в окислительной среде способствует резкому повышению коэффициента поглощения.

Во многом определяют протекание газолазерной резки металлов условия фокусировки лазерного излучения. При резке углеродистых сталей, титановых сплавов и цветных металлов лучшие результаты (повышение глубины реза и снижение его ширины) получены при фокусировке лазерного излучения в пятна меньшего диаметра, с целью повышения плотности мощности в зоне обработки. Для этого следует применять лазерные установки с возможно меньшим диаметром выходящего из резонатора лазерного пучка, работающие в одномодовом режиме, а также более короткофокусные линзы для фокусирования лазерного излучения.

Наиболее существенными факторами, влияющими на процесс газолазерной резки металлов, являются мощность лазерного излучения, скорость резки, давление поддуваемого газа.

В настоящее время в ходе теоретических и экспериментальных исследований выработаны следующие рекомендации по выбору оптимальных режимов резки углеродистых сталей больших толщин: повышение, увеличение давления кислорода. Что позволяет повысить скорость резки. Учитывая, что с повышением мощности лазерных установок их стоимость резко возрастает, не всегда экономически целесообразно применять более мощное оборудование при резке

этих сталей. При резке нержавеющей сталей больших толщин, для получения качественных резов предпочтительно применять линзы с большим фокусным расстоянием ($F \sim 200$ мм). При использовании же более короткофокусных линз ($F \sim 100$ мм) необходимо проводить резку при пониженных значениях мощности лазерного излучения ($P = 0,5$ кВт). Существенным фактором, влияющим на характеристики резов, является энергетические параметры процессов, к которым относятся мощность и плотность мощности лазерного излучения. Удобной величиной, характеризующей эффективность и качество процесса, оказывается комплексный параметр, представляющий собой отношение мощности излучения к скорости резки P/V_p или P/h (где h - глубина прорезания металла). Если потери на теплопроводность значительно меньше потерь на нагрев и плавление материала, можно записать выражение для баланса энергии:

$$h \cdot V_p \cdot b(C \cdot \rho \cdot T_{пл} + L_{пл}) = \eta \cdot P;$$

где P - суммарная мощность лазерного излучения и экзотермической реакции окисления; $\eta = \eta_s \cdot \eta_t$ - эффективность процесса (η_s - эффективный КПД; η_t - термический КПД); $L_{пл}$ - удельная энергия плавления металла.

Так как при лазерной резке ширина реза равна диаметру лазерного луча, то из последнего выражения следует, что $V_p \sim P$ при $h = \text{const}$.

Зависимость скорости резки от толщины пластины менее определена, поскольку допустимая скорость может также ограничиваться качеством резки. Однако в общем случае $V_p \sim h^{-1}$.

С ростом скорости параметр P/h , характеризующий затраты мощности на единицу глубины реза, возрастает.

Плотность мощности E_f в зоне воздействия лазерного излучения на материал является также величиной комплексной и зависит не только от мощности, но и от условий его фокусирования, модового состава луча, его расходимости, диаметра пучка на выходе из резонатора. Поэтому при выполне-

нии работ по газолазерной резке материалов применяются две схемы подачи газа в зону реза: соосно с лучом лазера через сопло газолазерного резака (рис. 1,а); сбоку под углом к оптической оси луча через специальный капилляр (форсунку) (рис. 1,б).

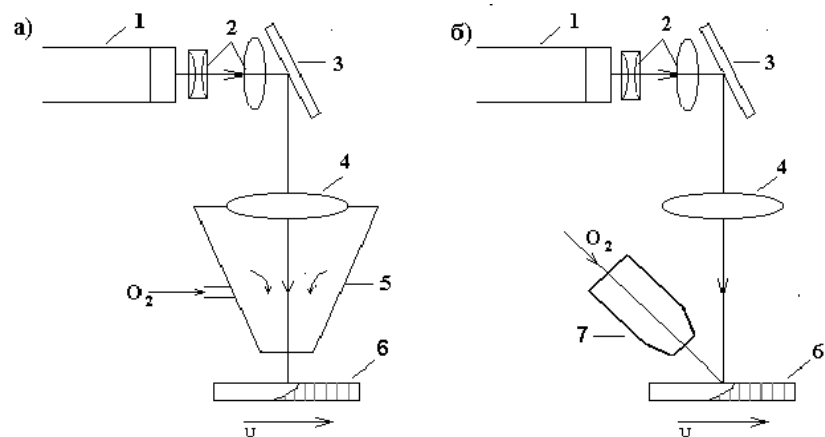


Рис.1 Схема газолазерной резки материалов

1 - лазер, 2- телескопическая система, 3 - зеркало, 4- объектив, 5 - сопло, 6 - деталь, 7-форсунка.

Порядок выполнения работы.

1. Включить лазерную установку согласно техническому описанию.
2. Провести юстировку оптической системы СОК-1 по схеме на (рис.1).
3. Установить оптимальный расход подачи технологической среды в зону резки.
4. Провести исследования зависимости глубины реза от скорости перемещения образца относительно лазерного луча при различных значениях фокусного расстояния объектива: $F_1=50\text{мм}$; $F_2=100\text{мм}$; $F_3=200\text{мм}$ и толщины материала $h=0,5; 1$;

- 1,5; 2 (мм). Построить график зависимости $h=F(v)$.
- Исследовать влияние степени расфокусировки на ширину реза для материалов толщиной $h=1;1,5$ (мм). Построить график.
 - Определить зависимость ширины реза от мощности излучения лазера.
 - Составить отчет о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

- Метод газолазерной резки материалов.
- Газолазерная резка металлов и диэлектриков.
- Основные факторы, влияющие на процесс газолазерной резки материалов.
- Выбор оптимальных технологических режимов для процесса газолазерной резки металлов.

Литература.

- Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф. Стельмаха – М.: Энергия, 1975, с.82-102
- Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, А.Н. Какора Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975, 295с.
- Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн.7. Л 17 Лазерная резка металлов: Учебн. Пособие для вузов/ А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов; Под ред. А.Г. Григорьянца.- М.: Высш. шк., 1988.- 127с.: ил.
- А.Г. Григорьянц Основы лазерной обработки материалов.- М.: Машиностроение, 1989.- 304 с.: ил.

Учебное издание

Мышковец Виктор Николаевич
Максименко Александр Васильевич

Лазерная технология обработки материалов

Лабораторный практикум

Подписано в печать Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. п.л. Уч.-изд. л. Тираж 50 экз. Заказ
Отпечатано на ротапринтере ГГУ. г. Гомель, ул. Советская, 104.
Лицензия