

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
Кафедра технологии машиностроения

# ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Методические указания к лабораторным работам

Составители:  
В. В. МОРОЗОВ  
Т. А. ЖЕЛОБОВА  
А. В. ЖДАНОВ



Владимир 2016

УДК 621.373.8  
ББК 32.86  
Л17

Рецензент  
Доктор технических наук, профессор  
зав. кафедрой технологии машиностроения  
Ковровской государственной технологической академии  
имени В. А. Дегтярева  
*Ю. З. Житников*

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Лазерные технологии** : метод. указания к лаб. работам /  
Л17 Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых ; сост.: В. В. Морозов, Т. А. Желобова, А. В. Жданов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. – 44 с.

Изложена методика проведения лабораторных работ, посвященных изучению технологических возможностей лазерного излучения, в ходе которых студенты экспериментальным путем устанавливают степень воздействия лазерного излучения на обрабатываемый материал в зависимости от его энергетических параметров, особенности формообразования отверстий и их точность, оптимальные условия их прошивки; приобретают навыки по техническому нормированию этой операции, а также изучают влияние режима лазерной резки на качественные показатели этого процесса.

Предназначены для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 12.03.05 – Лазерная техника и лазерные технологии.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 13. Табл. 5. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.373.8  
ББК 32.86

## **ВВЕДЕНИЕ**

Лабораторные работы – важная часть процесса изучения дисциплин, связанных с лазерными технологиями. При выполнении работ студенты кроме лучшего усвоения теоретического материала приобретают навыки разработки и исследования технологических операций.

Проведение каждой лабораторной работы складывается из нескольких этапов:

1) постановки преподавателем цели работы и выдачи варианта задания каждой бригаде (из 2 – 3 студентов);

2) краткого повторного инструктажа по технике безопасности в соответствии с характером выполняемой работы;

3) самостоятельного изучения студентами содержания работы, выполнения операционных эскизов обработки заготовки, подготовки таблиц для записи наблюдений, выполнения предварительных расчетов;

4) проверки преподавателем усвоения студентами содержания и методики проведения работы;

5) непосредственного выполнения каждой бригадой лабораторной работы на лазерном технологическом оборудовании и приборах при участии учебного персонала и под руководством преподавателя;

6) обработки и анализа экспериментального материала, составления графиков, выполнения окончательных расчетов;

7) оформления студентами отчета о работе;

8) сдачи (защиты) работы.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Лабораторные работы проводят на лазерных технологических установках, что требует внимания и осмотрительности. На первом занятии преподаватель проводит инструктаж по технике безопасности, что регистрируется в журнале инструктажа и подтверждается личной подписью каждого студента. Перед выполнением очередной лабораторной работы преподаватель в соответствии с темой повторно инструктирует студентов.

*Студентам не разрешается:*

- приступать к выполнению работ без ознакомления с правилами техники безопасности;
- устанавливать заготовки и включать лазерную установку без разрешения и в отсутствие преподавателя;
- работать без опущенных или придвинутых защитных экранов;
- открывать распределительные электрощиты.

Студенты должны знать расположение рубильников аварийного отключения энергии и места размещения средств пожаротушения.

## ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Оформляется каждым студентом на листах формата А4. Текст отчета набирают на ЭВМ. Используют шрифт Times New Roman, 12 или 14 кегль и 1,5 межстрочный интервал. Эскизы и графики выполняют в любом графическом редакторе с необходимыми обозначениями, цифрами и надписями. Графики результатов экспериментов строят в масштабах. На первую страницу отчета сверху выносят стандартный заголовок.

|                         |   |                            |
|-------------------------|---|----------------------------|
| ВлГУ,<br>кафедра<br>ТМС | Отчет<br>о лабораторной работе № _____<br>(наименование работы) | Фамилия, инициалы студента |
|                         |   | Группа                     |
|                         |   | Количество страниц         |

Отчет должен содержать:

- цель и краткое содержание работы;
- характеристику оборудования, инструмента и заготовок;
- схему проведения опыта (эскиз технологической операции);

- схему измерения поверхностей с указанием измерительного инструмента, прибора и точности измерений;
- расчетные формулы с числовым решением;
- графики зависимостей, построенные по результатам опытов;
- краткие выводы по работе.

В конце отчета студент ставит личную подпись и дату проведения работы. Законченные и аккуратно оформленные отчеты студенты предъявляют преподавателю, как правило, до начала выполнения следующей работы. При сдаче (защите) работы и хорошем освоении материала студенты получают зачет. Отчет хранится на кафедре.

## **Лабораторная работа № 1**

### **ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Цель работы* – установить степень воздействия лазерного излучения на обрабатываемый материал в зависимости от его энергетических параметров.

#### *Теоретические положения*

Такие физические характеристики лазерного излучения, как когерентность, монохроматичность и интенсивность, обусловили его применение в различных технологических процессах тепловой обработки материалов.

С помощью оптических управляющих систем лазерное излучение может быть сфокусировано в луч шириной  $0,3 \div 1$  мрад. С малой шириной лазерного луча связана возможность получения в нем чрезвычайно высокой плотности мощности. От уровня интенсивности лазерного излучения и длительности его воздействия зависит вид технологической операции, в которой оно может быть использовано: термообработка, сварка, резка, пробивка отверстий и др.

Характер и интенсивность воздействия в первую очередь зависят от плотности мощности лазерного излучения  $E$  (Вт/м<sup>2</sup>) в зоне обработки:  $E = P / F_{\text{пятн}}$ , где  $P$  – мощность лазерного излучения, Вт;  $F_{\text{пятн}}$  – площадь пятна лазерного излучения, сфокусированного на поверхности, м<sup>2</sup>.

При уровнях до пороговой плотности мощности излучения  $E^*$  имеет место активный разогрев металла без разрушения, при котором не наблюдается заметного испарения. Такие источники нагрева используют для термообработки, наплавки, легирования. Значения  $E^*$  у разных металлов различны и зависят от теплоты испарения, теплопроводности и длительности нагрева. Для большинства металлов  $E^*$  находится в пределах  $10^9 \div 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Превышение  $E^*$  вызывает нагрев металла до первой температуры разрушения – плавления. При дальнейшем поглощении излучения металл расплавляется и от участка воздействия излучения в объеме материала начинает перемещаться фазовая граница плавления. Энергетическое воздействие лазерного излучения приводит к последующему нагреву до второй температуры разрушения – кипения, когда возникает активное испарение. При значительном превышении плотности мощности излучения над  $E^*$  основная доля энергии лазерного излучения расходуется на интенсивное испарение материала и увеличение внутренней энергии разлетающихся паров, капель и твердых частиц, а энергия, затрачиваемая на плавление металла, относительно мала. Соответственно, жидкая фаза в зоне обработки практически отсутствует.

От плотности мощности лазерного излучения зависят количество расплавленного металла, стационарная температура, скорость плавления и испарения. Изменяя плотность мощности и время воздействия лазерного излучения на металлы, можно управлять этим процессом. Жесткий режим при отсутствии жидкой фазы в зоне обработки используют при пробивке отверстий. Снижение плотности мощности приводит к увеличению жидкой фазы, происходит интенсивное проплавление. Такой режим применяют при резке и сварке металлов.

### *Содержание работы*

Определение влияния энергетических параметров лазерного излучения на форму и интенсивность протекания процессов в материале обрабатываемой заготовки; выделение интервалов плотности мощности лазерного излучения, обеспечивающей различные виды технологических процессов тепловой обработки материалов.

## Оборудование, заготовки

Оборудование: лазерная технологическая установка (ЛТУ) «NAVIGATOR» модели КС-5ВДМ1, основанная на волоконном лазере мощностью 3 кВт.

Заготовки: призматические или цилиндрические образцы из сталей 1Х18Н9Т, 30ХГСА; твердого сплава Т15К6; латуни Л62; дюралюминия Д16Т; керамики марки ЦМ332.

### Порядок выполнения работы

1. Составить схему обработки образца (рис. 1).

2. Подготовить таблицу для записи исходных данных и результатов опытов.

3. На столе ЛТУ установить образец и задать соответствующий очередному опыту режим обработки. Выполнить обработку.

4. Изучить результаты воздействия лазерного излучения на образец. Описать их в таблице результатов и определить процесс лазерной обработки, который возможен при таком режиме лазерного излучения.

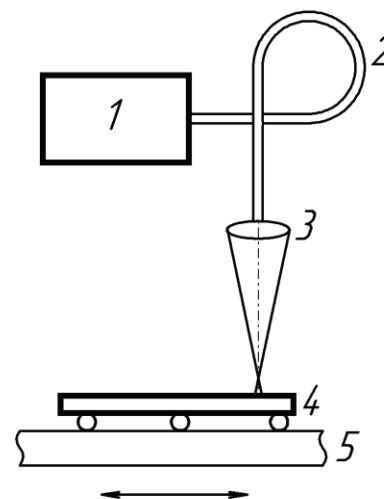


Рис. 1. Схема передачи лазерного излучения в зону обработки: 1 – излучатель; 2 – оптоволоконный кабель; 3 – фокусирующая система; 4 – обрабатываемая заготовка; 5 – рабочий стол

### Исходные данные и результаты экспериментов

| Номер опыта | Режим обработки  |  | Результат воздействия лазерного излучения | Возможный процесс обработки |
|-------------|--|--|---|-----------------------------|
|             | При интенсивности излучения на поверхности обрабатываемого изделия, Вт/см <sup>2</sup> | При длительности воздействия лазерного излучения, с    |   |                             |
| 1           | $0,5 \cdot 10^4 \div 2,0 \cdot 10^5$<br>с шагом $0,5 \cdot 10^4$                       | $10^{-2} \div 1$<br>с шагом $0,25 \cdot 10^{-2}$       |   |                             |
| 2           | $2,0 \cdot 10^5 \div 2,0 \cdot 10^6$<br>с шагом $2,5 \cdot 10^5$                       | $10^{-3} \div 1$<br>с шагом 0,25                       |   |                             |
| 3           | $2,0 \cdot 10^6 \div 2,0 \cdot 10^7$<br>с шагом $2,5 \cdot 10^6$                       | $10^{-3} \div 1$<br>с шагом 0,25                       |   |                             |
| 4           | $10^7 \div 10^8$<br>с шагом $2,5 \cdot 10^7$   | $10^{-5} \div 10^{-3}$<br>с шагом $0,25 \cdot 10^{-3}$ |   |                             |

## ***Отчет о работе***

Отчет о работе должен содержать:

- 1) наименование, цель и содержание работы;
- 2) описание оборудования, характеристику опытных образцов;
- 3) схему обработки;
- 4) таблицу с данными по режимам и результатами обработки;
- 5) выводы о степени воздействия на обрабатываемый материал лазерного излучения в зависимости от его энергетических параметров и интервалы режима обработки, обеспечивающие возможные виды процессов лазерной обработки.

### ***Рекомендуемая литература***

Лазерная техника и технология : учеб. пособие для вузов : в 7 кн. / под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : Высш. шк., 1988.

## **Лабораторная работа № 2**

### **ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

***Цель работы*** – экспериментальное изучение зависимости формы отверстия от положения фокуса фокусирующей линзы относительно поверхности заготовки.

### ***Теоретические положения***

Процесс формообразования глухих отверстий обусловлен четырьмя факторами: положением фокуса фокусирующей линзы относительно наружной поверхности заготовки; энергетическими параметрами лазерного излучения; теплофизическими и оптическими характеристиками обрабатываемого материала; видом и расходом технологического и/или защитного газов.

Положение фокуса фокусирующей линзы определяет место наибольшей концентрации энергии. От того, где это происходит (на поверхности заготовки, внутри металла или над поверхностью), зависит соотношение процессов, связанных с условиями нагрева, плавления и кипения металла в области воздействия лазерного излучения, т. е. характер протекания квазистатической и динамической фаз.



При положении фокуса на поверхности заготовки в период квазистатической фазы, когда происходит постепенный нагрев материала и изменение прочностных связей некоторого объема облучаемого материала с основной его массой, зона прогретого материала с определенного момента времени начинает перемещаться в глубь заготовки. Этот период является основным по формированию канала отверстия. По мере углубления луча в толщину материала происходит постепенное его плавление. Постепенность этого процесса по длине действия луча – основная причина образования конусности обрабатываемого отверстия. Поскольку гидростатическое и капиллярное давления, имеющие место в зоне обработки, являются функцией плотности жидкого металла, высоты его столба и температуры в зоне обработки, то при определенных условиях может иметь место образование цилиндрических отверстий.

При переходе процесса обработки в динамическую фазу происходит взрывообразный выброс перегретого материала из полости отверстия. Однако ввиду высокой плотности энергии светового луча материал из зоны обработки истекает по стенкам обрабатываемого отверстия. Обладая высокой температурой и кинетической энергией, поток расплавленного металла в процессе движения дополнительно размывает и уплотняет стенки образующегося отверстия. При достижении наружной поверхности заготовки расплавленный металл либо выбрасывается из зоны обработки, либо застывает в виде наплыва на наружной поверхности детали.

Динамические силы, действующие в период выброса расплавленного металла из зоны обработки, разбивают и размывают входную часть отверстия, образуя входной конус.

При смещении фокуса фокусирующей линзы в толщу материала имеет место отличный от рассмотренного выше механизм обработки. В этом случае место наибольшей концентрации энергии находится на некоторой глубине от поверхности. Наличие в толще материала теплового источника формирует изолированно от поверхности заготовки ядро расплавленного материала. Рост этого ядра заканчивается образованием канала проводимости, через который расплавленный материал под действием сильного термодинамического взрыва выбрасывается наружу. Такой механизм обработки не может обеспечить геометрически правильной формы обработанного отверстия, вследствие

чего оно имеет входной конус, далее основной цилиндрический или конический участок и в конце элемент бочкообразной формы.

При расположении фокуса фокусирующей линзы над поверхностью материала в фокальной плоскости линзы возникает плазма, которая со значительной скоростью движется к поверхности заготовки и обрушивается на нее. При высоких плотностях энергии имеет место пробой воздуха, фронт которого распространяется к линзе. За счет этого поглощается значительная часть энергии излучения. Оставшаяся часть энергии взаимодействует с верхними слоями заготовки, вследствие чего возникает квазистатическая фаза, которая при определенных условиях переходит в динамическую. Образовавшееся отверстие имеет коническую форму. При этом скорость образования отверстия ниже, а диаметр больше, чем при предыдущих расположениях фокуса.

### ***Содержание работы***

Пробивка глухих отверстий в заготовке при разных фокусных расстояниях фокусирующей линзы от ее поверхности; изучение геометрических параметров полученных отверстий и их измерение на большом инструментальном микроскопе БМИ-1, оборудованном индикаторами часового типа с ценой деления 1 мкм.

### ***Оборудование, инструмент, заготовки***

Оборудование: ЛТУ «NAVIGATOR» модели КС-5ВДМ1, основанная на волоконном лазере мощностью 3 кВт.

Инструмент: большой инструментальный микроскоп БМИ-1.

Заготовки: призматические заготовки с трехступенчатой верхней поверхностью, подъем ступеней  $\Delta f = 1 \div 2$  мм.

Материал заготовок: стали 1Х18Н9Т, 30ХГСА; твердый сплав Т15К6; латунь Л62; дюралюминий Д16Т; керамика марки ЦМ332.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Составить схему обработки заготовки.
2. Выполнить настройку оптической системы ЛТУ, выставив положение фокуса фокусирующей линзы на поверхности средней ступени заготовки. При настройке использовать вспомогательные оптические средства как наиболее удобные в работе и обеспечивающие достаточно высокую точность (рис. 2).

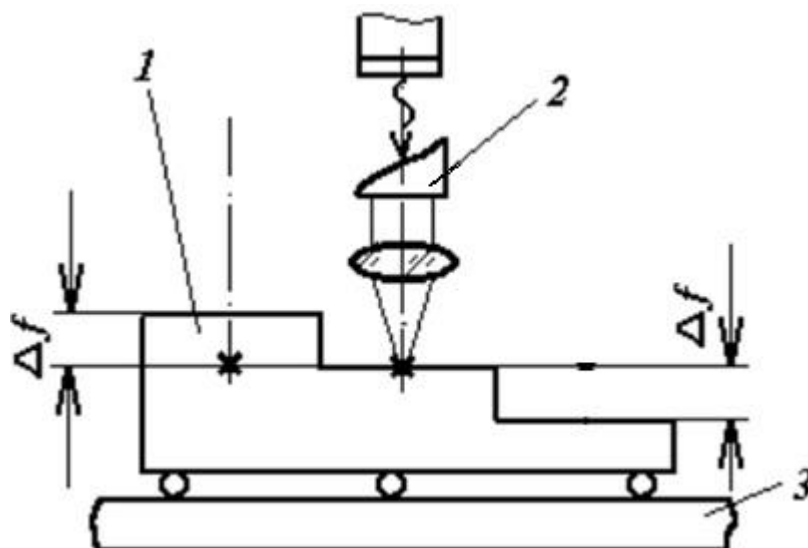


Рис. 2. Схема настройки ЛТУ с помощью дополнительной оптики: 1 – заготовка; 2 – фокусирующая система; 3 – рабочий стол

3. Выполнить на одной осевой линии пробивку по три отверстия на каждой ступени заготовки. Высота ступени  $\Delta f$  определяет смещение фокуса линзы относительно плоскости настройки: на верхней ступени в глубь материала – на  $\Delta f$ ; на первой ступени над поверхностью заготовки – на  $\Delta f$ .

4. Разрезать заготовку на фрезерном станке вдоль осевой линии обработанных отверстий до их диаметральной плоскости (рис. 3). Вскрытую поверхность довести на шлифовальном и полировальном оборудовании.

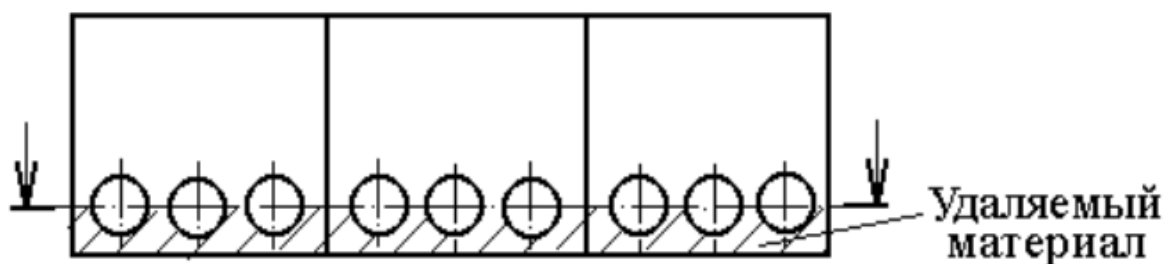


Рис. 3. Схема препарирования заготовки после пробивки отверстий

5. На микроскопе БМИ-1 изучить форму полученных отверстий, измерить их геометрические параметры. Сделать эскизы трех отверстий, полученных при различных положениях фокуса линзы относительно поверхностей заготовки, с указанием размеров их характерных

элементов. Размеры элементов каждого отверстия принять по усредненным результатам измерения трех отверстий на одной ступени заготовки.

6. По результатам эксперимента сделать вывод о связи геометрических параметров прошитых отверстий и положения фокуса фокусирующей линзы относительно поверхности заготовки.

*Измерение линейных размеров на большом инструментальном микроскопе БМИ-1.* Измерительный микроскоп – это бесконтактный оптический прибор, с помощью которого, наблюдая в увеличенном виде контуры детали, измеряют линейные и угловые размеры элементов этих контуров в прямоугольных или полярных координатах. Процесс измерения осуществляется непосредственно по линейным и угловым шкалам прибора (абсолютный метод измерения).

Ход лучей и оптическая схема БМИ представлены на рис. 4.

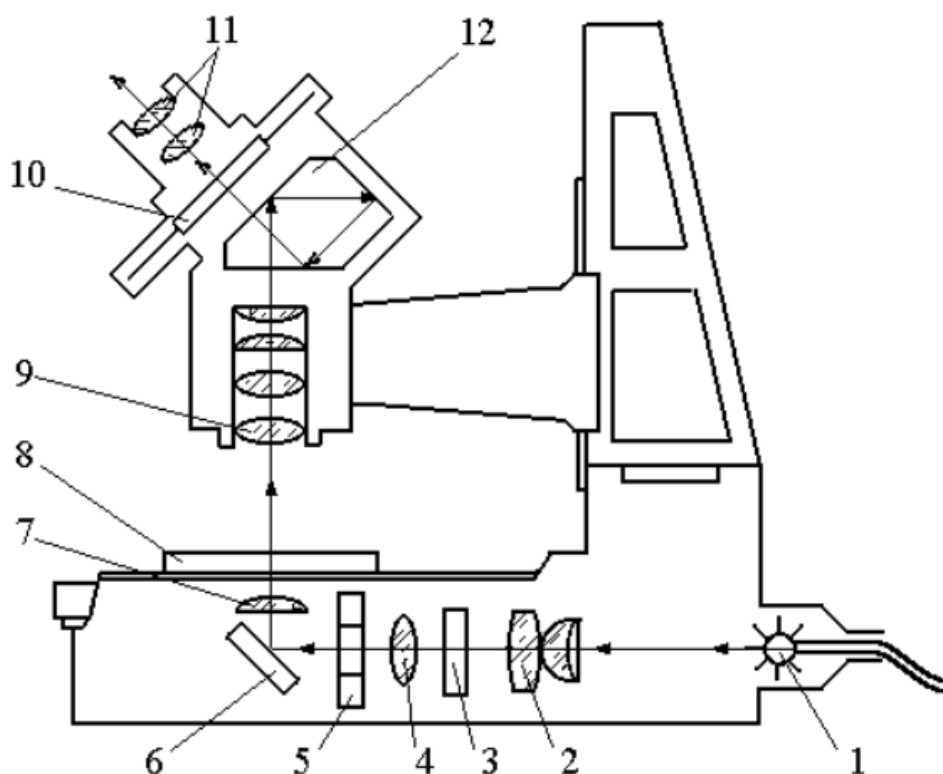


Рис. 4. Оптическая схема большого инструментального микроскопа

Лучи от лампы 1 через конденсоры 2 и 4 и светофильтр 3 проходят через ирисовую диафрагму 5, размер которой устанавливается в зависимости от размера измеряемой детали. Затем пучок лучей падает на поворотное зеркало 6 и через конденсор 7 освещает снизу контур предмета, лежащего на предметном столе 8. После этого поток лучей,

несущий в себе контур предмета, попадает в объектив 9, который увеличивает изображение контура в 1,5 раза, а также превращает его в обратное. Это неудобное для оператора обстоятельство устраняется оборотной призмой 12, с помощью которой обратное изображение становится прямым. После призмы 12 лучи попадают в наблюдательную часть окулярной головки на пластину 10 со штриховой сеткой, которая расположена в фокусной плоскости объектива 9. Линзы окуляра 11 увеличивают изображение предмета еще в 20 раз, и оператор наблюдает прямое изображение предмета увеличенным в 30 раз и наложенным на штриховую сетку. Линейные размеры измеряют на БМИ в двух прямоугольных координатах непосредственно по отсчетным устройствам кареток стола. Стол микроскопа состоит из поперечной каретки с микропарой, имеющей также отсчет 0,005 мм.

Диапазон измерений БМИ в продольном направлении по координате  $X$  составляет  $0 \div 150$  мм, а в поперечном направлении по координате  $Y$   $0 \div 50$  мм. Цена деления отсчета кареток 5 мкм. Погрешность измерения линейных размеров составляет  $\pm 3$  мкм.

### ***Отчет о работе***

Отчет о работе должен содержать:

- 1) наименование, цель и содержание работы;
- 2) описание оборудования, инструмента, эскиз и характеристику заготовок;
- 3) схему обработки и настройки оптической системы ЛТУ;
- 4) эскизы форм прошитых отверстий с указанием размеров характерных элементов этих отверстий при положении фокуса фокусирующей линзы относительно поверхности заготовки: а) на поверхности; б) внутри материала; в) над поверхностью;
- 5) выводы с объяснением особенностей протекания процесса лазерной пробивки глухих отверстий при разных положениях фокуса фокусирующей линзы относительно поверхности заготовки и их влияния на геометрические параметры пробитых отверстий.

### ***Рекомендуемая литература***

Суминов, В. М. Обработка деталей лучом лазера / В. М. Суминов. – М. : Машиностроение, 1969. – 196 с.

### Лабораторная работа № 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ

*Цель работы* – установить, используя статистический метод исследования, точность диаметральных размеров отверстий, полученных путем лазерной прошивки.

### *Теоретические положения*

Статистический метод исследования точности используют при обработке партии деталей на предварительно настроенном оборудовании. Он базируется на построении кривых распределения размеров, точность достижения которых устанавливается.

Для партии заготовок, обрабатываемых при одной настройке ЛТУ на размер, погрешности обработки можно разделить:

- на систематические постоянные, возникающие из-за неточности настройки элементов оптической системы на размер;
- систематические изменяющиеся, связанные с физико-химическими свойствами материала;
- случайные, вызываемые нестандартностью режима излучения и неточностью установки обрабатываемой заготовки.

Кривые распределения строят следующим образом. Измеряют интересующий параметр у партии деталей, обработанных при определенных условиях. Поле его рассеяния  $\omega = A^{НБ} - A^{НМ}$  разбивают на несколько равных интервалов. Количество интервалов выбирают в зависимости от общего количества измеренных деталей так, чтобы в каждый из интервалов попало достаточное количество значений измеренного параметра. Результаты измерений представляют в таблице и графически. Для этого по оси абсцисс откладывают интервалы, а по оси ординат – количество значений измеренного параметра, попавших в каждый из интервалов (частота).

Если количество значений измеренного параметра, попавших в каждый интервал, изобразить в виде прямых линий, расположенных посередине каждого из интервалов, и соединить их верхние точки ломаной линией, получим поле рассеяния, или практическую кривую рассеяния. При увеличении количества деталей в партии, сужении

интервалов и увеличении их числа ломаная линия превращается в плавную кривую, называемую теоретической кривой рассеяния.

Из теории вероятности известно, что если рассеяние какой-либо величины (размера, шероховатости, твердости и т. д.) зависит от совокупного действия многих факторов одного порядка, являющихся случайными, не зависящими или слабо зависящими один от другого, то оно следует закону нормального распределения рассеяния, или закону Гаусса (рис. 5), который описывается выражением

$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ , где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение, представляющее собой абсциссу точки перегиба кривой.

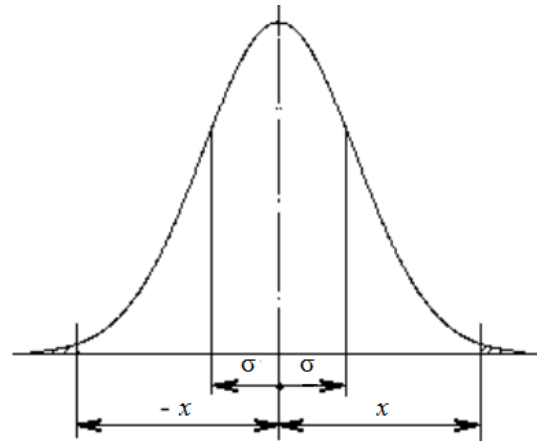


Рис. 5. Теоретическая кривая, характеризующая нормальный закон распределения

Численными характеристиками рассеяния случайной величины служат: 1) положение центра её группирования (рассеяния)  $\bar{x}$ ; 2) мера её рассеяния  $\sigma$  относительно центра группирования.

$$\bar{x} = \frac{x_1 n_1 + x_2 n_2 + \dots + x_k n_k}{n} = \frac{\sum x_i n_i}{n}, \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 n_1 + (x_2 - \bar{x})^2 n_2 + \dots + (x_k - \bar{x})^2 n_k}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 n_i}{n}}, \quad (2)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_k$  – размеры отдельных деталей;  $n_1, n_2, \dots, n_k$  – количество деталей разного размера;  $n$  – общее количество деталей в выборке.

Около центра группирования исследуемого параметра в основном располагаются все остальные значения случайной величины, при этом теоретическая кривая нормального распределения простирается в обе стороны вдоль оси абсцисс беспрестанно, асимптотически приближаясь к этой оси. Предельные отклонения, выраженные в долях среднеквадратического отклонения  $\sigma$ , ограничивают обычно  $\pm 3\sigma$ . В эту область попадает 99,73 % значений случайной величины.

Условием обработки без брака является неравенство  $T > \pm 3\sigma$ . Оно показывает, что фактическое рассеяние действительных размеров

меньше установленного допуска. В противном случае действительные размеры выходят за пределы допуска и весьма вероятно появление бракованных деталей. Процент годных деталей определяют по выражению

$$P_{\text{годн}} = [\Phi_{(И_1)} + \Phi_{(И_2)}] 100 \%, \quad (3)$$

а процент брака рассчитывают как  $P_{\text{бр}} = 100 - P_{\text{годн}}$ .

$\Phi_{(И)}$  – функция Лапласа, значения которой приведены в табл. 1.

$$И_1 = \left( \frac{T}{2} + c \right) / \sigma; \quad И_2 = \left( \frac{T}{2} - c \right) / \sigma, \quad (4)$$

где  $c = \bar{x} - x_0$ , а  $x_0$  – размер середины поля допуска исследуемого параметра по чертежу.

Т а б л и ц а 1

Значения функции Лапласа

| И    | $\Phi_{(И)}$ | И    | $\Phi_{(И)}$ | И    | $\Phi_{(И)}$ |
|------|--------------|------|--------------|------|--------------|
| 0,00 | 0,0000       | 1,05 | 0,3531       | 2,10 | 0,4821       |
| 0,05 | 0,0199       | 1,10 | 0,3643       | 2,15 | 0,4842       |
| 0,10 | 0,0398       | 1,15 | 0,3749       | 2,20 | 0,4861       |
| 0,15 | 0,0596       | 1,20 | 0,3849       | 2,25 | 0,4878       |
| 0,20 | 0,0793       | 1,25 | 0,3944       | 2,30 | 0,4893       |
| 0,25 | 0,0987       | 1,30 | 0,4032       | 2,35 | 0,4906       |
| 0,30 | 0,1179       | 1,35 | 0,4115       | 2,40 | 0,4918       |
| 0,35 | 0,1368       | 1,40 | 0,4192       | 2,45 | 0,4929       |
| 0,40 | 0,1554       | 1,45 | 0,4265       | 2,50 | 0,4938       |
| 0,45 | 0,1736       | 1,50 | 0,4332       | 2,55 | 0,4945       |
| 0,50 | 0,1915       | 1,55 | 0,4394       | 2,60 | 0,4953       |
| 0,55 | 0,2088       | 1,60 | 0,4452       | 2,65 | 0,4960       |
| 0,60 | 0,2257       | 1,65 | 0,4505       | 2,70 | 0,4965       |
| 0,65 | 0,2422       | 1,70 | 0,4554       | 2,75 | 0,4970       |
| 0,70 | 0,2580       | 1,75 | 0,4599       | 2,80 | 0,4974       |
| 0,75 | 0,2734       | 1,80 | 0,4641       | 2,85 | 0,4978       |
| 0,80 | 0,2881       | 1,85 | 0,4678       | 2,90 | 0,4981       |
| 0,85 | 0,3023       | 1,90 | 0,4713       | 2,95 | 0,4984       |
| 0,90 | 0,3159       | 1,95 | 0,4744       | 3,00 | 0,4986       |
| 0,95 | 0,3289       | 2,00 | 0,4772       | 3,10 | 0,4990       |
| 1,00 | 0,3413       | 2,05 | 0,4798       | 3,20 | 0,4993       |



По виду и расположению кривой распределения действительных размеров исследуемого параметра относительно середины поля его допуска можно судить о преобладающих погрешностях, возникающих в процессе обработки. Смещение центра группирования относительно середины поля допуска обусловлено постоянными погрешностями. Случайные погрешности определяют величину рассеяния размеров исследуемого параметра. Закономерно изменяющиеся погрешности искажают форму кривой распределения.

### ***Содержание работы***

Прошивка 50 отверстий в образце на ЛТУ, измерение диаметров этих отверстий, вычисление статистических характеристик рассеяния значений диаметров этих отверстий, построение практической и теоретической кривых распределения диаметров отверстий и анализ точности операции.

### ***Оборудование, инструмент, заготовки***

Оборудование: ЛТУ «NAVIGATOR» модели КС-5ВДМ1, основанная на волоконном лазере мощностью 3 кВт.

Инструмент: большой инструментальный микроскоп БМИ-1.

Заготовки: призматические пластины размерами  $100 \times 50 \times 1$  мм из сталей 1Х18Н9Т, 30ХГСА; латуни Л62; дюралюминия Д16Т.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Разработать геометрический план прошивки 50 отверстий диаметром 1 мм в пластине, составить эскиз операции, схему расположения заготовки на столе ЛТУ. На схеме показать базирование заготовки, движение лазерного луча относительно заготовки, режим обработки. Подготовить расчетную таблицу.

2. Подобрать режим прошивки отверстий и прошить 50 отверстий диаметром 1 мм в пластине при постоянной настройке ЛТУ.

3. Измерить обработанные отверстия на БМИ-1. Измерения делать 2 – 3 раза, среднее арифметическое значение записать.

4. Определить поле рассеяния значений диаметров  $\omega = A^{\text{НБ}} - A^{\text{НМ}}$ .

5. Разбить полученные значения на интервалы. Установить средние значения интервалов. Заполнить расчетную таблицу.

### Расчетная таблица

| Интервал | Среднее значение $x_i$ | Количество $n_i$ | $x_i n_i$ | $(x_i - \bar{x})$ | $(x_i - \bar{x})^2$ | $(x_i - \bar{x})^2 n_i$ |
|----------|------------------------|------------------|-----------|-------------------|---------------------|-------------------------|
|          |                        |                  |           |                   |                     |                         |

6. Вычислить статистические характеристики  $\bar{x}$  и  $\sigma$  по формулам (1) и (2). Определить величину смещения середины распределения относительно середины поля допуска  $c = \bar{x} - x_0$ .

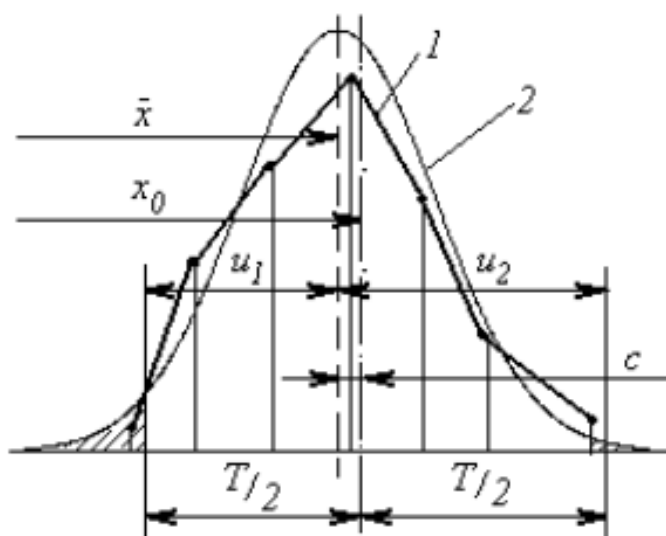


Рис. 6. Практическая 1 и теоретическая 2 кривые распределения

Оценить точность операции, сравнив  $\sigma$  с допуском  $T_\phi$ .

7. Найти вероятный процент годных и бракованных отверстий по формулам (3) и (4).

8. Построить практическую кривую распределения размеров отверстия. Для этого по оси абсцисс откладывают значения середины интервалов, а по

оси ординат – количество отверстий, попадающих в данный интервал, наносят точки, которые затем соединяют прямыми (рис. 6).

9. На графике (см. рис. 6) в том же масштабе строят кривую нормального распределения (симметрично относительно  $\bar{x}$ ). Для построения наносят несколько точек, которые соединяют плавной кривой. За начало координат принимают середину распределения  $\bar{x}$ ; координаты точек следующие:

|   |       |              |            |              |            |              |            |
|---|-------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| x | 0     | 0,5 $\sigma$ | 1 $\sigma$ | 1,5 $\sigma$ | 2 $\sigma$ | 2,5 $\sigma$ | 3 $\sigma$ |
| y | 0,40b | 0,35b        | 0,24b      | 0,13b        | 0,05b      | 0,02b        | 0,004b     |

Здесь  $b = \Delta x n / \sigma$ , где  $\Delta x$  – величина интервала размеров;  $n$  – количество отверстий в выработке;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение.

10. Сделать вывод о причинах, вызывающих снижение точности отверстий на исследуемой операции, и предложить мероприятия для устранения причин, снижающих точность процесса их прошивки.

### ***Отчет о работе***

Отчет должен содержать:

- 1) наименование, цель и содержание работы;
- 2) описание оборудования, инструмента, эскиз и характеристику заготовки;
- 3) геометрический план обрабатываемой поверхности заготовки, эскиз операции, схему расположения заготовки на столе ЛТУ. На схеме показать базирование заготовки, движение лазерного луча, режим обработки;
- 4) таблицу с результатами измерений и расчетов;
- 5) расчеты статистических характеристик;
- 6) вероятные проценты выхода годных деталей и брака;
- 7) графики практического и теоретического распределений размеров;
- 8) краткие выводы о возможных причинах, вызывающих систематические постоянные, систематические изменяющиеся и случайные погрешности обработки на исследуемой операции, и меры по их устранению.

### ***Рекомендуемая литература***

Основы технологии машиностроения : учеб. для вузов / под ред. В. С. Корсакова. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – М. : Машиностроение, 1977. – 416 с.

## **Лабораторная работа № 4**

### **НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ**

***Цель работы*** – установить эмпирическую зависимость линейных размеров отверстий, полученных путем лазерной прошивки, от технологических факторов и определить оптимальные условия их обработки.

### Теоретические положения

В процессе формообразования отверстия необходимо обеспечить точность его двух параметров – диаметра  $D$  и глубины  $L$ . В силу сложных термодинамических процессов, имеющих место при взаимодействии лазерного луча с обрабатываемым материалом, геометрические размеры отверстий являются функцией целого ряда конструктивно-технологических элементов лазерного излучателя, режимов обработки и т. п. Основные факторы, влияющие на результат прошивки отверстия:

- $d$  – диаметр пятна контакта с поверхностью металла;
- $F_{\Pi}$  – расстояние фокуса линзы относительно поверхности заготовки;
- $\tau_2$  – коэффициент пропускания выходной оптики;
- $P$  – выходная мощность лазерного излучения.

Поскольку перечисленные факторы не зависят друг от друга, то для установления их связи с размерами получаемого отверстия и определения оптимальных условий протекания процесса может быть использовано многофакторное планирование эксперимента.

1. Выявленные факторы влияния и интервалы их варьирования в натуральном значении представляют в табл. 2. В ней же указывают их кодированный вид: «+1» – верхний уровень; «-1» – нижний; «0» – основной.

Т а б л и ц а 2

Уровни и интервалы варьирования факторов влияния

| Фактор    | Кодовое обозначение | Интервал варьирования | Уровень факторов |              |             |
|-----------|---------------------|-----------------------|------------------|--------------|-------------|
|           |                     |                       | верхний «+1»     | основной «0» | нижний «-1» |
| $P$       | $X_1$               | 0,5                   | 3,0              | 2,5          | 2,0         |
| $d$       | $X_2$               | 14,5                  | 0,2              | 0,4          | 0,6         |
| $F_{\Pi}$ | $X_3$               | 15,0                  | 5,0              | 2,5          | 0,0         |

П р и м е ч а н и я. 1. Для сокращения времени и затрат на эксперимент коэффициент пропускания выходного зеркала  $\tau_2$  принят постоянным и равным 0,1.

2. Численные значения уровней и интервалов факторов при проведении опытов должны быть спроектированы в зависимости от возможностей лабораторной лазерной установки.

Кодированные значения факторов, которые выполняются так, чтобы верхний уровень каждого фактора соответствовал «+1», а нижний – «-1», находят по формулам:

$$X_1 = \frac{P - P_0}{\Delta P}, \quad X_2 = \frac{d - d_0}{\Delta d}, \quad X_3 = \frac{F_{\text{п}} - F_{\text{п}0}}{\Delta F_{\text{п}}},$$

где  $P_0, d_0, F_{\text{п}0}$  – натуральные значения факторов на основных уровнях;  $\Delta P, \Delta d, \Delta F_{\text{п}}$  – значения интервалов варьирования.

В проводимом эксперименте  $P_0 = 2,5$  кВт,  $d_0 = 0,4$  мм,  $F_{\text{п}0} = 2,5$  мм, а  $\Delta P = 0,5$  кВт,  $\Delta d = 0,2$  мм,  $\Delta F_{\text{п}} = 2,5$  мм.

2. Постулируют математическую модель процесса.

Под моделью понимают вид функции отклика (зависимости изучаемого параметра от факторов влияния)  $y = f(X_1, X_2, X_3, \dots)$ . В нашем случае это  $D = f(P, d, F_{\text{п}})$  или  $L = f(P, d, F_{\text{п}})$ .

Предварительные (пристрелочные) однофакторные испытания, когда поочередно определяют зависимость изучаемого параметра от каждого фактора влияния при фиксированных значениях остальных, показали, что графики частных зависимостей  $L(D) = f(V)$ ,  $L(D) = f(d)$  и  $L(D) = F_{\text{п}}$  в пределах принятых значений факторов влияния с достаточной точностью могут быть аппроксимированы прямыми линиями. Следовательно, если ограничиваться линейным приближением, в качестве математической модели процесса может быть принят алгебраический полином первой степени  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$ .

3. Составляют матрицу планирования экспериментов в виде таблицы.

Матрица планирования

| Номер опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | Результат опыта |                 |                  |                 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
|             |       |       |       |       | $y^{\text{I}}$  | $y^{\text{II}}$ | $y^{\text{III}}$ | $y_{\text{ср}}$ |
| 1           | +1    | -1    | -1    | +1    |                 |                 |                  |                 |
| 2           | +1    | +1    | -1    | +1    |                 |                 |                  |                 |
| 3           | +1    | -1    | +1    | +1    |                 |                 |                  |                 |
| 4           | +1    | +1    | +1    | +1    |                 |                 |                  |                 |
| 5           | +1    | -1    | -1    | -1    |                 |                 |                  |                 |
| 6           | +1    | +1    | -1    | -1    |                 |                 |                  |                 |
| 7           | +1    | -1    | +1    | -1    |                 |                 |                  |                 |
| 8           | +1    | +1    | +1    | -1    |                 |                 |                  |                 |
| 9           | +1    | 0     | 0     | 0     |                 |                 |                  |                 |
| 10          | +1    | 0     | 0     | 0     |                 |                 |                  |                 |
| 11          | +1    | 0     | 0     | 0     |                 |                 |                  |                 |

Опыты повторяют три раза и по их результатам находят среднее значение  $y_{\text{ср}}$ .

4. Определяют дисперсию  $S_y^2$  исследуемого параметра.

Дисперсия – это среднее значение квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения. Знание ее необходимо для оценки адекватности (соответствия, тождества) изучаемого процесса принятой модели:

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1} = \frac{(y_{\text{ср}}^9 - \bar{y})^2 + (y_{\text{ср}}^{10} - \bar{y})^2 + (y_{\text{ср}}^{11} - \bar{y})^2}{n-1},$$

где  $y_i, y_{\text{ср}}^9, y_{\text{ср}}^{10}, y_{\text{ср}}^{11}$  – полученные значения исследуемого параметра в последних трех опытах;  $\bar{y} = (y_{\text{ср}}^9 + y_{\text{ср}}^{10} + y_{\text{ср}}^{11})/3$  – его среднее значение по результатам трех опытов;  $n$  – число опытов при  $X_1 = X_2 = X_3 = 0$ . Для облегчения расчета  $S_y^2$  целесообразно воспользоваться вспомогательной таблицей.

Вспомогательная таблица для расчета  $S_y^2$

| Номер опыта | Номер опыта по матрице планирования | $\bar{y}$ | $y_i$                                  | $(y_i - \bar{y})$ | $(y_i - \bar{y})^2$      |
|-------------|-------------------------------------|-----------|--|-------------------|--------------------------|
| 1           | (9)                                 |           | $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i}{3}$ |                   |                          |
| 2           | (10)                                |           |  |                   |                          |
| 3           | (11)                                |           |  |                   |                          |
|             |                                     |           |  |                   | $\sum (y_i - \bar{y})^2$ |

5. Определяют коэффициенты регрессии математической модели:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{N},$$

где  $N$  – число опытов.

В выполняемой лабораторной работе свободный член

$$b_0 = \frac{y_{\text{ср}}^1 + y_{\text{ср}}^2 + y_{\text{ср}}^3 + y_{\text{ср}}^4 + y_{\text{ср}}^5 + y_{\text{ср}}^6 + y_{\text{ср}}^7 + y_{\text{ср}}^8}{8}.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, определяют по формулам

$$b_1 = \frac{-y_{cp}^1 + y_{cp}^2 - y_{cp}^3 + y_{cp}^4 - y_{cp}^5 + y_{cp}^6 - y_{cp}^7 + y_{cp}^8}{8};$$

$$b_2 = \frac{-y_{cp}^1 - y_{cp}^2 + y_{cp}^3 + y_{cp}^4 - y_{cp}^5 - y_{cp}^6 + y_{cp}^7 + y_{cp}^8}{8};$$

$$b_3 = \frac{y_{cp}^1 + y_{cp}^2 + y_{cp}^3 + y_{cp}^4 - y_{cp}^5 - y_{cp}^6 - y_{cp}^7 - y_{cp}^8}{8}.$$

6. Проверяют значимость вычисленных коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента.

Доверительный интервал коэффициентов регрессии  $\Delta b_i = \pm t S_{bi}$ , где  $t$  – критерий Стьюдента;  $S_{bi}$  – средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии,  $S_{bi} = \pm \sqrt{S_y^2 / N}$ , где  $N$  – число проведенных опытов.

Критерий Стьюдента  $t$  при 5%-м уровне значимости определяют по табл. 3 в зависимости от числа степеней свободы  $\Delta n = n - 1$ , где  $n$  – число параллельных опытов при  $X_1 = X_2 = X_3 = 0$ . В выполняемой лабораторной работе таких опытов запланировано три. Следовательно,  $\Delta n = 3 - 1 = 2$  и  $t = 4,3$  (см. табл. 3), а доверительный интервал коэффициентов регрессии  $\Delta b_i = \pm 4,3 S_{bi}$ . Те коэффициенты регрессии, которые по абсолютной величине окажутся больше доверительного интервала  $\Delta b_i$ , признают статистически значимыми. Незначимыми считают те коэффициенты регрессии, которые по абсолютной величине меньше доверительного интервала  $\Delta b_i$ .

Т а б л и ц а 3

Значения  $t$  при 5%-м уровне значимости

|                        |       |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| Число степеней свободы | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Значения $t$           | 12,71 | 4,30 | 3,18 | 2,78 | 2,57 | 2,45 |
| Число степеней свободы | 7     | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
| Значения $t$           | 2,37  | 2,30 | 2,26 | 2,23 | 2,20 | 2,18 |
| Число степеней свободы | 13    | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   |
| Значения $t$           | 2,16  | 2,14 | 2,13 | 2,12 | 2,11 | 2,10 |

Незначимость коэффициентов может быть вызвана следующими причинами:

- а) включением в исследование факторов, оказывающих несущественное влияние на параметр оптимизации;
- б) малой точностью эксперимента;
- в) неудачным выбором интервалов варьирования.

В такой ситуации необходимо расширить интервалы варьирования факторов, повысить точность эксперимента путем увеличения числа параллельных (дублирующих) опытов или улучшить методику проведения опытов.

7. Выявляют выражение, определяющее зависимость исследуемого параметра отверстия ( $D, L$ ) от факторов влияния, подставив в принятую математическую модель (п. 2) значения вычисленных коэффициентов регрессии (п. 6), заменив кодированные значения  $X_1, X_2, X_3$  их натуральными значениями (п. 1) и упростив её.

8. Проверяют гипотезу адекватности модели реальному процессу по критерию Фишера  $F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}$ , где  $S_y^2$  – дисперсия параметра оптимизации (определена в п. 4);  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности,  $S_{ад}^2 = \frac{(\sum_{j=1}^N (y_j \hat{y}_j)^2)}{f}$ , где  $y_j$  – экстремальное значение функции отклика;  $\hat{y}_j$  – значение функции отклика, вычисленное по полученному в п. 7 выражению, устанавливающему зависимость исследуемого параметра от факторов влияния;  $f$  – число степеней свободы,  $f = N - (k + 1)$ , где  $N$  – число опытов в матрице планирования ( $N = 8$ );  $k$  – число факторов влияния ( $k = 3$ ).

Расчетный коэффициент Фишера  $F_p$  сопоставляют с табличным (табл. 4). При  $F_p < F_{табл}$  модель адекватна.

Т а б л и ц а 4

Значения критерия Фишера  $F$  при 5%-м уровне значимости

| Число степеней свободы для $S_y^2$ | Значения критерия при числе степеней свободы для $S_{ад}^2$ |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 12    | 24    |
| 1                                  | 164,4   | 199,5 | 215,7 | 224,6 | 230,2 | 234,0 | 244,9 | 249,0 |
| 2                                  | 18,5  | 19,2  | 19,2  | 19,3  | 19,3  | 19,3  | 19,4  | 19,4  |
| 3                                  | 10,1  | 9,6   | 9,3   | 9,1   | 9,0   | 8,9   | 8,7   | 8,6   |
| 4                                  | 7,7   | 6,9   | 6,6   | 6,4   | 6,3   | 6,2   | 5,9   | 5,8   |
| 5                                  | 6,6   | 5,8   | 5,4   | 5,2   | 5,1   | 5,0   | 4,7   | 4,5   |



Если  $F_p > F_{\text{табл}}$ , модель неадекватна. Адекватную модель можно получить:

- а) изменив интервалы варьирования факторов;
- б) сместив центр плана;
- в) достройкой плана – переходом к центральному композиционному планированию второго порядка и аппроксимации отклика полиномом вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^3.$$

Восемь опытов полного факторного эксперимента дополняют шестью опытами в точках, лежащих на осях координат  $X, Y, Z$ , и в центре эксперимента число опытов доводят до шести.

9. Устанавливают оптимальные режимы при прошивке отверстий методом крутого восхождения.

Полученное уравнение можно использовать для расчета условий крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинают с нулевой точки (основной уровень):  $X_1 = 4,5$ ;  $X_2 = 15,5$ ;  $X_3 = 35,0$ . Для одного из факторов выбирают шаг движения примерно 0,1 от интервала его варьирования. Для остальных факторов его рассчитывают по выражению

$$\Delta_i = (\Delta l b_i \varepsilon_i) / (b_j \varepsilon_j),$$

где  $\Delta_i$  – шаг движения по градиенту для  $i$ -го фактора;  $\Delta l$  – выбранный шаг движения по градиенту для фактора  $l$ ;  $b_i, b_j$  – коэффициенты регрессии  $i$ -го и  $j$ -го факторов;  $\varepsilon_i, \varepsilon_j$  – интервалы варьирования  $i$ -го и  $j$ -го факторов.

#### Расчет крутого восхождения

| Фактор                                | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $y$ |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-----|
| Характеристика                        |       |       |       |     |
| Основной уровень                      | 4,5   | 15,5  | 35,0  |     |
| Коэффициент $b_i$                     |       |       |       |     |
| Интервал варьирования $\varepsilon_i$ | 0,5   | 14,5  | 15,0  |     |
| $b_i \varepsilon_i$                   |       |       |       |     |
| Шаг $\Delta_i$                        |       |       |       |     |
| Округленный шаг                       |       |       |       |     |
| Опыт № 9                              |       |       |       |     |
| Опыт № 10                             |       |       |       |     |
| .....                                 |       |       |       |     |
| .....                                 |       |       |       |     |

Крутое восхождение прекращают, когда найдены условия оптимальности или ограничения факторов делают дальнейшее движение по градиенту бесперспективным.

### ***Содержание работы***

Разработать многофакторное планирование эксперимента по установлению оптимальных условий лазерной прошивки отверстий с заданными параметрами, выполнить этот эксперимент, обработать его результаты, получить эмпирическую зависимость между параметрами оптимизации и условиями обработки и, пользуясь методом крутого восхождения, установить оптимальные условия для получения отверстия с заданными параметрами.

### ***Оборудование, инструмент, заготовки***

Оборудование: ЛТУ «NAVIGATOR» модели КС-5ВДМ1, основанная на волоконном лазере мощностью 3 кВт.

Инструмент: большой инструментальный микроскоп БМИ-1.

Заготовки: призматические пластины размерами  $100 \times 30 \times 5$  мм из сталей 1Х18Н9Т; 30ХГСА; латуни Л62; дюралюминия Д16Т.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Изучить теоретические положения к лабораторной работе.
2. Составить эскиз операции, наметить обработку по три отверстия в ряд поперек заготовки при одинаковых режимах.
3. Подготовить таблицу (см. табл. 2) с уровнями и интервалами варьирования факторов влияния. Постулировать математическую модель процесса. Составить матрицу планирования экспериментов.
4. Выполнить обработку отверстий на запланированных условиях, трижды повторив каждый опыт. Измерить параметры оптимизации (диаметр, длину отверстия) на БМИ-1. Результаты трехкратной обработки при одинаковых режимах усреднить и принять за действительный размер. Результаты экспериментов представить в матрице планирования.
5. Обработать результаты эксперимента:
  - рассчитать дисперсию исследуемого параметра  $S_y^2$ ;

- рассчитать коэффициенты регрессии;
- проверить значимость вычисленных коэффициентов регрессии;
- вывести выражение, определяющее зависимость исследуемого параметра от факторов влияния;
- выполнить проверку адекватности модели реальному процессу.

6. Установить оптимальные условия проведения операции лазерной прошивки отверстий, пользуясь методом крутого восхождения: для каждого из факторов влияния устанавливается шаг движения по градиенту; условия выполнения каждого последующего опыта определяют последовательным прибавлением шага движения к предыдущему значению фактора. Начальный уровень восхождения – основной уровень факторов. Часть опытов в движении по градиенту может быть пропущена. Крутое восхождение прекращают, если найдены условия оптимизации или ограничения факторов делают движение по градиенту неразумным.

7. Представить выводы с рекомендациями оптимальных условий выполнения операции лазерной прошивки отверстий с заданными геометрическими параметрами.

### ***Отчет о работе***

Отчет о работе должен содержать:

- 1) наименование, цель и содержание работы;
- 2) описание оборудования, инструмента, эскиз и характеристику заготовки, эскиз обработки;
- 3) таблицу с уровнями и интервалами варьирования факторов влияния;
- 4) математическую модель процесса;
- 5) матрицу планирования опытов и их результаты;
- 6) обработку результатов эксперимента;
- 7) эмпирическую зависимость исследуемого параметра от факторов влияния;
- 8) разработку плана поиска оптимальных условий проведения операции лазерной прошивки отверстий и его результаты;
- 9) выводы по результатам эксперимента.

### **Рекомендуемая литература**

1. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента : учеб. пособие / А. А. Спиридонов, Н. Г. Васильев. – Свердловск : Изд-во Урал. политехн. ин-та им. С. М. Кирова, 1975. – 152 с.
2. Суминов, В. М. Обработка деталей лучом лазера / В. М. Суминов. – М. : Машиностроение, 1969. – 196 с.

### **Лабораторная работа № 5**

## **ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ**

**Цель работы** – приобретение навыков по техническому нормированию операций лазерной обработки.

### **Теоретические положения**

Технически обоснованная норма времени – важный производственно-технологический показатель. На ее основе осуществляют календарное планирование, оплату труда рабочих, выявляют возможность организации многостаночного обслуживания и др.

Норма штучного времени при лазерной обработке складывается:

– из основного (машинного) времени на операцию  $t_o = \sum t_{oi}$ , которое затрачивается на изменение состояния продукта производства, имеющее место в процессе обработки, мин;  $t_{oi}$  – основное время на выполнение  $i$ -го перехода обработки элементарной поверхности;

– вспомогательного времени  $t_{всп} = t_{вУ} + t_{мв}$ , включающего в себя время  $t_{вУ}$  на установку и снятие заготовок и время  $t_{мв}$ , связанное с выполнением вспомогательных ходов и перемещений при обработке поверхностей детали, мин;

– времени на обслуживание рабочего места  $t_{обс}$ , мин;

– времени на перерывы в работе  $t_{п}$ , мин.

Таким образом,  $T_{шт} = t_o + t_{всп} + t_{обс} + t_{п}$ .

Время лазерной работы технологической установки по программе управления (время цикла обработки)  $t_{п.у}$  равно неполному оперативному времени ее работы:  $t_{оп.н} = t_{п.у} = t_o + t_{мв}$ .

В практике используют два метода нормирования: метод технического расчета норм времени по нормативам и метод расчета норм на основе изучения затрат рабочего времени посредством наблюдения (посредством хронометража).

При первом методе нормирования основное время при лазерной прошивке отверстий определяют как частное от деления объема удаляемого материала  $Q$  ( $\text{мм}^3$  или г) на производительность метода  $Q_{\text{пр}}$  (объем материала, удаляемого с поверхности детали за один импульс или серию импульсов в единицу времени ( $\text{мм}^3/\text{мин}$  или г/мин)), т. е.  $t_o = Q / Q_{\text{пр}}$  (мин).

Вспомогательное время, затрачиваемое на установку и снятие обрабатываемой заготовки, ее измерение и управление механизмами оборудования, определяют по нормативам.

Время на техническое и организационное обслуживание рабочего места и перерывы в работе на отдых рабочего определяют в процентах от оперативного времени:

$$t_{\text{оп}} = t_o + t_{\text{всп}}; \quad t_{\text{обс}} = (3 \div 5)\% t_{\text{оп}}; \quad t_{\text{п}} = (2 \div 3)\% t_{\text{оп}}.$$

При обработке заготовок партиями в норму времени учитывают время на переналадку оборудования, или подготовительно-заключительное время ( $t_{\text{п/з}}$ ) на одну деталь:

$$T_{\text{шт}} = t_o + t_{\text{всп}} + t_{\text{обс}} + t_{\text{п}} + t_{\text{п/з}}.$$

Производительность обработки во многом зависит от типа используемого лазера.

При определении нормы времени посредством хронометража изучают затраты времени на выполнение циклически повторяющихся ручных и машинно-ручных элементов операции для установления их фактической продолжительности.

### ***Содержание работы***

Составление плана и эскиза операций лазерной прошивки 10 ÷ 50 отверстий в заданной детали, расчет длин вспомогательных относительных перемещений обрабатываемой детали и лазерной головки; обработка детали на лазерной технологической установке с одновременным наблюдением и фиксированием времени, затрачиваемого на выполнение отдельных приемов и переходов:  $t_{\text{ву}}$ ,  $t_{\text{оп.н}}$ ; определение  $t_{\text{мв}}$ ,  $t_o$  и производительности обработки.

## Оборудование, инструмент, заготовки

Оборудование: ЛТУ «NAVIGATOR» модели КС-5ВДМ1, основанная на волоконном лазере мощностью 3 кВт.

Инструмент: секундомеры; весы физические.

Заготовки: призматические образцы размерами  $100 \times 50 \times 1$  мм из сталей 1Х18Н9Т, 30ХГСА; латуни Л62; дюралюминия Д16Т.

### Порядок выполнения работы

1. Разработать геометрический план обработки заготовки, составить эскиз операции с циклограммой ее обработки, схему расположения заготовки на столе (рис. 7, 8). На схеме показать базирование заготовки,

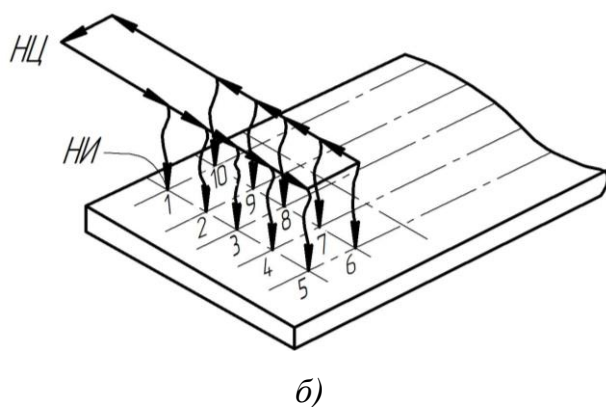
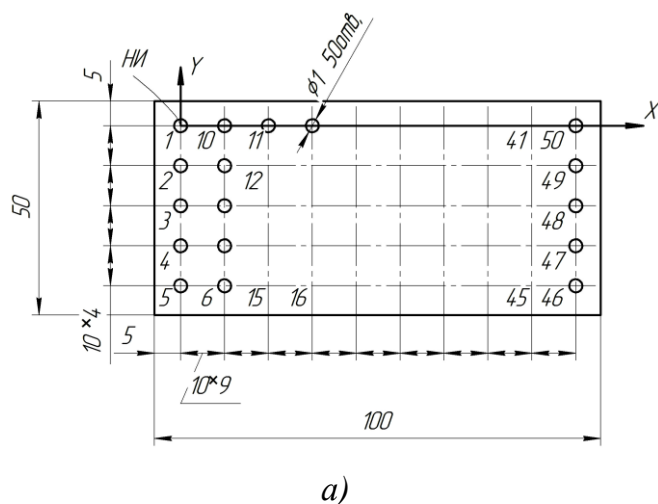


Рис. 7. Геометрический план обработки заготовки: а – циклограмма; б – прошивка отверстий

заготовки, движение луча относительно заготовки, режим обработки.

2. Подобрать режим прошивки отверстий.

3. Рассчитать длину холостых перемещений  $l_{xx}$  луча (лазерной головки) относительно заготовки в течение операции, необходимых для перехода от одного отверстия к другому. Рассчитать время  $t_{мв} = l_{xx}/S_{xx}$ , где  $S_{xx}$  – скорость холостых перемещений рабочих органов ЛТУ. По нормативам скорость установочного перемещения (позиционирования) принята равной 50 мм/мин.

4. Подготовить хронометражную карту – карту наблюдений. Наметьте и запишите в карте содержание отдельных приемов и переходов, последовательность их выполнения и затраты времени.

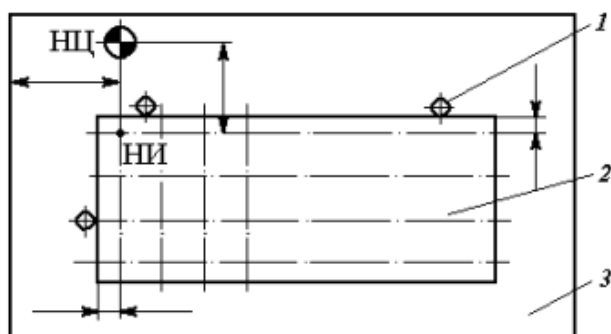


Рис. 8. Схема расположения заготовки на столе ЛТУ: 1 – опора; 2 – заготовка; 3 – рабочий стол

5. Взвесить заготовку на физических весах ( $Q_{\text{заг}}$ ).

6. Выполнить обработку заготовки по программе, фиксируя с помощью секундомера время выполнения каждого намеченного приема и перехода. Наблюдение делают одновременно несколько студентов, например первый студент замечает текущее (накапливающееся) время по приемам в течение всего процесса обработки заготовки; второй и третий студенты определяют продолжительность выполнения отдельных приемов и переходов. Хронометрирование операции повторить несколько раз. Данные наблюдений записать в хронометражную карту.

### Хронометражная карта

| № п/п | Наименование приемов и переходов               | Номер наблюдений |   |   |   |   | Сумма времен, с | Количество наблюдений | Среднее время приемов, с | Примечание |
|-------|--|------------------|---|---|---|---|-----------------|-----------------------|--------------------------|------------|
|       |  | 1                | 2 | 3 | 4 | 5 |                 |                       |                          |            |
| 1     | Установить деталь на столе ЛТУ                 |                  |   |   |   |   |                 |                       |                          |            |
| 2     | Прошить $n$ отверстий в заготовке по программе |                  |   |   |   |   |                 |                       |                          |            |
| 3     | Снять деталь со стола ЛТУ. Уложить в тару      |                  |   |   |   |   |                 |                       |                          |            |

7. Взвесить обработанную деталь ( $Q_d$ ). Определить массу удаленного металла:  $q = Q_{\text{заг}} - Q_d$ .

8. Обработать результаты наблюдений:

– вычислить продолжительность каждого приема и перехода: из основного времени вычесть время предыдущего и последующего переходов; найти среднюю продолжительность их выполнения;

– по содержанию приемов выделить время  $t_{\text{вУ}}$  и время  $t_{\text{оп.н}}$  и определить их продолжительность в операции;

– определить вспомогательное время  $t_{\text{всп}} = t_{\text{вУ}} + t_{\text{мв}}$ ;

– определить основное время прошивки всех  $n$  отверстий детали:

$$\sum_{i=1}^n t_{oi} = t_{\text{оп.н}} - t_{\text{мв}};$$

– найти штучное время операции  $T_{\text{шт}}$ .

9. Рассчитать производительность лазерной прошивки отверстий на данной ЛТУ:  $Q_{\text{пр}} = q / \sum_{i=1}^n t_{oi}$ .

### ***Отчет о работе***

Отчет о работе должен содержать:

- 1) наименование, цель, содержание работы;
- 2) данные об оборудовании, инструменте и заготовках;
- 3) эскиз обрабатываемой детали и план прошивки отверстий;
- 4) результаты взвешивания детали до и после обработки;
- 5) расчет длины необходимых холостых перемещений  $l_{\text{хх}}$  рабочих органов ЛТУ и времени  $t_{\text{мв}}$ , необходимого на эти перемещения;
- 6) хронометражную карту с результатами наблюдений;
- 7) расчет основного и штучного времени прошивки  $n$  отверстий;
- 8) расчет производительности лазерной прошивки отверстий на ЛТУ;
- 9) краткие выводы о возможных путях уменьшения основного и вспомогательного времени на рассмотренной операции.

### ***Рекомендуемая литература***

Суминов, В. М. Обработка деталей лучом лазера / В. М. Суминов. – М. : Машиностроение, 1969. – 196 с.



## Лабораторная работа № 6

### ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА

**Цель работы** – установить зависимость глубины, ширины и шероховатости реза в углеродистых сталях при газолазерной резке (ГЛР) от скорости резки при различных условиях фокусировки лазерного излучения.

#### Теоретические положения

Основные факторы, определяющие производительность и качественные показатели процесса ГЛР металлов, – плотность мощности, скорость резки, давление и состав продуваемого газа, размеры и конфигурация сопла для подачи газа, расстояние от среза сопла до поверхности материала, вид, состав и свойства разрезаемых материалов.

Качество при газолазерной резке металлов характеризуют точностью резки, шероховатостью  $R_z$  и перпендикулярностью  $j$  реза, протяженностью зоны термического влияния  $b_{зтв}$ , шириной реза  $b$ , отставанием линии реза, количеством грата (наплывов на нижней кромке разрезанного металла), радиусом оплавления верхней кромки  $R$  (рис. 9).

Точность резки характеризуют: совпадением размеров вырезанной детали с заданными размерами; точностью работы исполнительных координатных устройств; энергетическими параметрами излучения; состоянием разрезаемого металла (наличием внутренних напряжений); тепловым воздействием на него процесса резки (возникновением тепловых деформаций); технологией резки (режимами резки, порядком выполнения резов и т. п.).

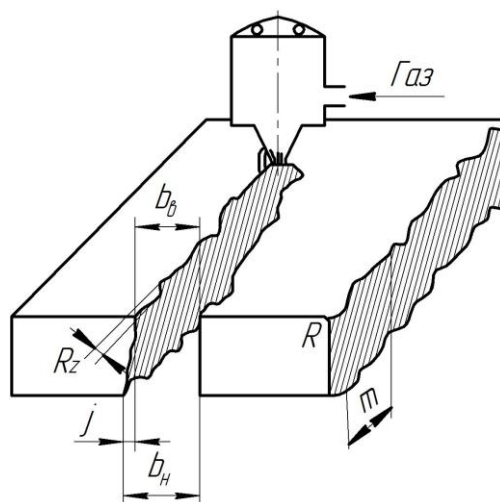


Рис. 9. Параметры реза

Шероховатость поверхности реза определяют по наличию на ней бороздок, по их глубине, частоте и форме. Она зависит от режима

резки, параметров струи продуваемого газа, свойств разрезаемого материала и погрешности координатного устройства. Образование бороздок на поверхности реза является следствием нестационарного процесса разрушения материала, характеризуемого периодическим выносом расплавленного металла из зоны обработки.

Для топографии поверхности реза характерно наличие трех зон, отличающихся друг от друга различным наклоном борозд относительно направления обработки и различной шероховатостью (рис. 10).

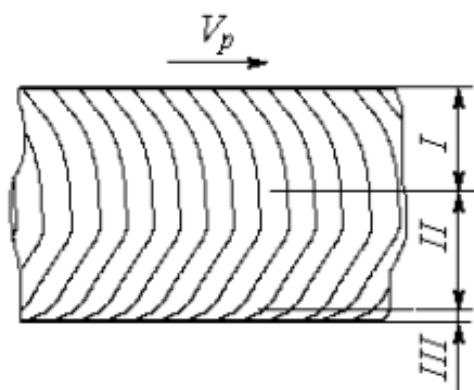


Рис. 10. Схема расположения борозд на поверхности реза в углеродистой стали

Зона I характеризует периодически протекающее разрушение от верхней кромки поверхности заготовки в глубь металла. Некоторый наклон борозд в направлении обработки зависит от соотношения скорости резки  $V_p$  и скорости распространения разрушения в глубь металла  $V_0$ .

Зона II, расположенная ниже зоны I, формируется непрерывно, но также имеет бороздчатую структуру, однако менее выраженную вследствие периодического удаления продуктов разрушения под действием струи газа из зоны I. Наклон борозд зоны II в направлении, противоположном направлению резки, определяется наклоном поверхности непрерывно протекающего разрушения.

Зона III на поверхности реза указывает на продолжение процесса резки, но без участия лазерной энергии, а лишь за счет струи газа и выдуваемых из зоны обработки перегретого расплавленного металла и его сплавов. При этом скорость прорезания металла резко снижается (о чем свидетельствует значительный наклон борозд к кромке металла) и, соответственно, ухудшается качество кромки реза.

Важный фактор, определяющий как характер протекания процесса резки металлов, так и размерные характеристики резов, – плотность мощности  $E_j$  в зоне воздействия на материал лазерного излуче-

ния. При конкретной мощности лазерного излучения ЛТУ повысить плотность мощности в зоне обработки можно, уменьшив диаметр  $d_f$  фокального пятна, что позволит увеличить глубину и уменьшить ширину реза.

Величина шероховатости поверхности реза зависит от скорости резки. Малым скоростям обработки (меньше 0,5 м/мин) соответствует режим самопроизвольной автогенной резки. При этом рез получается значительной ширины, определяемой диаметром струи кислорода, а не диаметром сфокусированного лазерного луча. Шероховатость поверхности реза, имеющей также бороздчатую структуру, высока.

Ширина реза на углеродистой стали у верхней кромки больше, чем в его средней части. Наличие на поверхности реза зоны III, характеризующейся значительным снижением скорости прорезания, обуславливает расширение реза на этом участке (у нижней кромки реза).

При малых скоростях обработки на поверхности реза в пластинах определенной толщины имеются только зоны I и II. С повышением скорости резки на поверхности реза появляется зона III с максимальной шероховатостью. Следовательно, для получения качественных резов, когда шероховатость поверхности  $R_z = 40 \div 50$  мкм, необходимо ограничивать скорость резки во избежание образования на поверхности реза зоны III.

### ***Содержание работы***

Лазерная резка заготовок из углеродистых сталей при разных диаметрах фокального пятна и разных скоростях резки; установление соответствующих им глубины и ширины реза; топографии и шероховатости поверхности реза; построение графиков зависимости глубины, ширины реза и шероховатости поверхности реза от скорости резки.

### ***Оборудование, инструмент, заготовки***

Оборудование: ЛТУ «NAVIGATOR» модели КС-5ВДМ1, основанная на волоконном лазере мощностью 3 кВт.

Инструмент: микроскоп МИС-11; большой инструментальный микроскоп БМИ-1.

Заготовки: призматические образцы размерами  $100 \times 20 \times 4$  мм из углеродистых сталей (стали 20, 30, 45).

### Порядок выполнения работы

1. Составить схему выполнения операции резки образцов. Подготовить таблицы для записи результатов опытов.

#### Зависимость $h$ и $b$ от $V_p$ и $d_f$

| №<br>П/П | $d_f$ ,<br>мм | $V_p$ ,<br>м/мин | $h$ ,<br>мм | $b$ ,<br>мм | №<br>П/П | $d_f$ ,<br>мм | $V_p$ ,<br>м/мин | $h$ ,<br>мм | $b$ ,<br>мм |
|----------|---------------|------------------|-------------|-------------|----------|---------------|------------------|-------------|-------------|
| 1        | 0,65          | 1                |             |             | 7        | 0,4           | 3                |             |             |
| 2        | 0,65          | 2                |             |             | 8        | 0,4           | 4                |             |             |
| 3        | 0,65          | 3                |             |             | 9        | 0,2           | 1                |             |             |
| 4        | 0,65          | 4                |             |             | 10       | 0,2           | 2                |             |             |
| 5        | 0,4           | 1                |             |             | 11       | 0,2           | 3                |             |             |
| 6        | 0,4           | 2                |             |             | 12       | 0,2           | 4                |             |             |

#### Зависимость шероховатости $R_z$ (мкм) поверхности реза в углеродистой стали от скорости резки

| $d_f$ , мм | $V_p$ ,<br>м/мин | Зоны |    |     | Графики $R_z = f(V_p)$ |
|------------|------------------|------|----|-----|------------------------|
|            |                  | I    | II | III |                        |
| 0,65       | 1                |      |    |     |                        |
|            | 2                |      |    |     |                        |
|            | 3                |      |    |     |                        |
|            | 4                |      |    |     |                        |
| 0,4        | 1                |      |    |     |                        |
|            | 2                |      |    |     |                        |
|            | 3                |      |    |     |                        |
|            | 4                |      |    |     |                        |
| 0,2        | 1                |      |    |     |                        |
|            | 2                |      |    |     |                        |
|            | 3                |      |    |     |                        |
|            | 4                |      |    |     |                        |

2. Установить образец на ЛТУ. Выбрать диаметр фокального пятна 0,6 мм. Выполнить на образце четыре реза, меняя скорость перемещения лазерного луча при каждом последующем резе согласно таблице зависимости  $h$  и  $b$  от  $V_p$  и  $d_f$ . Повторить опыт при диаметрах фокального пятна 0,4 и 0,2 мм.

3. Измерить глубину и ширину реза при разных условиях фокусировки на инструментальном микроскопе БМИ-1. Результаты измерений занести в таблицу зависимости  $h$  и  $b$  от  $V_p$  и  $d_f$ . Построить графики зависимости глубины и ширины реза от скорости резки при разных условиях фокусировки (рис. 11).

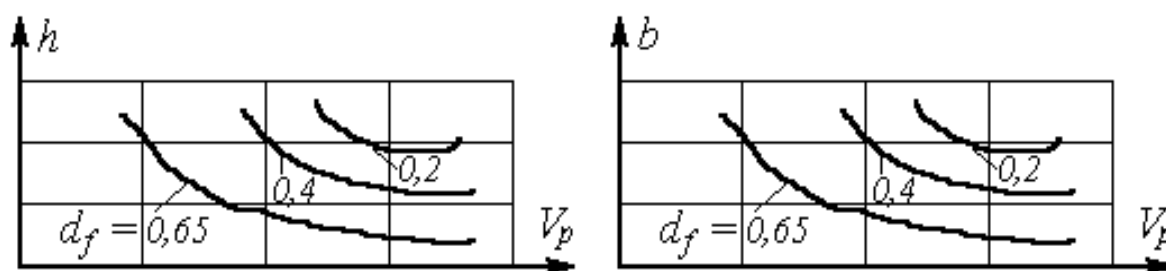


Рис. 11. Графики зависимости глубины и ширины реза в углеродистых сталях от скорости резки при различных условиях фокусировки

4. Изучить топографию поверхности резов, полученных при условиях резки согласно таблице зависимости  $h$  и  $b$  от  $V_p$  и  $d_f$ . Сделать схемы расположения борозд на поверхности резов с указанием, при каких условиях обработки они получены.

5. Измерить высоту шероховатости на каждой из трех зон поверхности реза у образцов. Результаты измерений занести в таблицу зависимости шероховатости поверхности реза от скорости резки. Для каждой зоны построить графики.

6. Проанализировать полученные результаты.

*Измерение шероховатости поверхности на микроскопе МИС-11.* Измерение шероховатости основано на определении величин неровностей, видимых в окуляре микроскопа как результат отражения от вершин и впадин узкого светового луча, падающего под углом  $45^\circ$  к поверхности. Принципиальная схема измерения показана на рис. 12. Из схемы видно, что  $b = cN = h\sqrt{2}N$ , откуда  $h = b / N\sqrt{2}$ , где  $h$  – высота неровностей;  $N$  – увеличение объектива микроскопа.

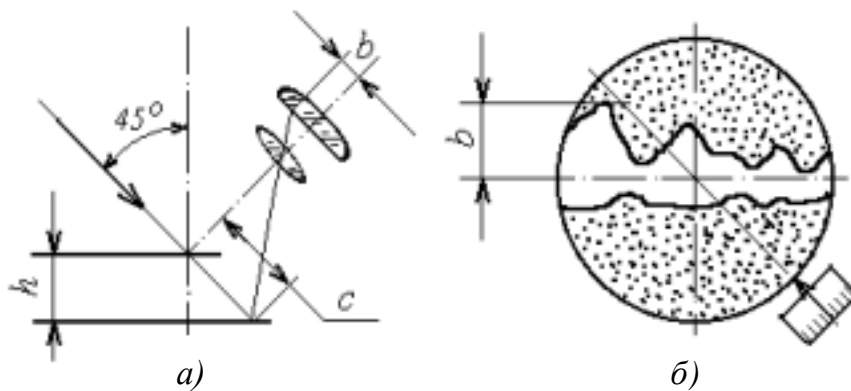


Рис. 12. Схема измерения шероховатости поверхности на микроскопе МИС-11: *a* – принципиальная схема; *б* – вид в окуляре

Величину  $b$  определяют с помощью микрометрического барабанчика окуляра, для этого горизонтальная нить окуляра совмещается сначала с гребнем, а затем со впадиной наиболее резкой стороны контура неровностей (см. рис. 12, *б*). При таком передвижении нити показания барабанчика (разность отсчетов делений) равны некоторой величине  $d$ . С учетом того, что направление перемещения нити относительно измеряемой высоты составляет угол  $45^\circ$ ,  $b = d / \sqrt{2}$ .

Подставив значение  $b$  в выражение для определения  $h$ , получим  $h = d / (2N)$  или в микрометрах  $h = 10d / (2N) = d \frac{5}{N}$ , где  $d$  – количество делений по барабанчику (цена деления 0,01 мм).

Для измерения шероховатости различной высоты на микроскоп должен быть установлен соответствующий сменный объектив (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Сменные объективы микроскопа МИС-11

| Параметр                          | Класс шероховатости поверхности |       |       |       |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
|                                   | 4 ÷ 6                           | 5 ÷ 8 | 7 ÷ 8 | 8 ÷ 9 |
| Фокусное расстояние объектива, мм | 25,0                            | 13,9  | 8,2   | 4,3   |
| Увеличение                        | 5,8                             | 10,5  | 18,0  | 34,5  |
| Значение $5/N$                    | 0,86                            | 0,48  | 0,28  | 0,15  |

Для определения  $R_z$  в поле зрения микроскопа выбирают пять наибольших неровностей, измеряют высоту каждой и вычисляют по формуле

$$R_z = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5) / 5.$$

Измерения делают 2 – 3 раза на разных участках поверхности. Погрешность измерения на микроскопе МИС-11 составляет  $\pm 15\%$ .

### ***Отчет о работе***

Отчет о работе должен содержать:

- 1) наименование, цель, содержание работы;
- 2) схему выполнения операции резки образцов;
- 3) таблицы с результатами опытов;
- 4) графики зависимости глубины, ширины реза и шероховатости поверхности реза от  $V_p$  и  $d_f$ ;
- 5) выводы на основе анализа полученных зависимостей.

### ***Рекомендуемая литература***

*Григорьянц, А. Г.* Лазерная техника и технология : учеб. пособие для вузов. В 7 кн. Кн. 7. Лазерная резка металлов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : Высш. шк., 1988. – 127 с.

## **Лабораторная работа № 7**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ**

***Цель работы*** – установить, используя статистический метод исследования, точность поверхностей деталей, полученных лазерной вырезкой<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Теоретические положения о содержании статистического метода исследования точности обработки партии деталей на предварительно настроенном оборудовании см. в лаб. работе № 3.

## *Содержание работы*

Вырезка пазов в заготовке по чертежу, измерение размеров вырезанных деталей и отверстий, оставшихся в заготовке после вырезки; вычисление статистических характеристик распределения значений измеренных параметров, построение практических кривых распределения и оценка точности операции вырезки.

### *Оборудование, инструмент, заготовки*

Оборудование: ЛТУ «NAVIGATOR» модели КС-5ВДМ1, основанная на волоконном лазере мощностью 3 кВт.

Инструмент: большой инструментальный микроскоп БМИ-1.

Заготовки: пять призматических образцов размерами  $100 \times 50 \times 3$  мм (рис. 13) из углеродистых сталей (стали 20, 30, 45).

### *Порядок выполнения работы*

1. Разработать геометрический план вырезки пазов в заготовке, составить эскиз операции, схему расположения заготовки на столе ЛТУ (см. лаб. работу № 5). На схеме показать базирование заготовки, ее движение относительно лазерного луча, режим резки. Подготовить две таблицы для записи результатов измерений и расчетов (см. лаб. работу № 3).

2. Подобрать режим резки.

3. Вырезать по десять пазов в каждой из пяти заготовок при постоянной настройке ЛТУ.

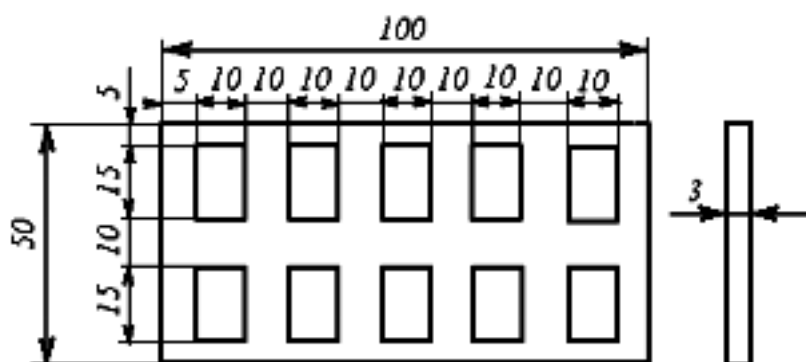


Рис. 13. Объект опытов



4. Измерить 50 вырезанных деталей по одному из размеров на большом инструментальном микроскопе БМИ-1. Измерения повторить три раза. Средние значения замеров принять за действительные и записать их в таблице.

Определить поле рассеяния измеренных размеров  $\omega = A^{\text{НБ}} - A^{\text{НМ}}$ .

Разбить полученные размеры на интервалы. Установить средние значения интервалов. Заполнить расчетную таблицу.

Вычислить статистические характеристики

$$\bar{x} = \frac{\sum(x_i n_i)}{n} \quad \text{и} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 n_i}{n}}$$

Определить величину смещения середины распределения размеров относительно середины поля допуска  $c = \bar{x} - x_0$ . Оценить точность операции, сравнив  $6\sigma$  с допуском на измеренный размер детали.

Построить практическую кривую распределения размеров вырезанных деталей.

Сделать вывод о причинах, вызывающих погрешность обработки.

5. Повторить исследование точности одного из размеров отверстий, оставшихся после вырезки, согласно п. 4.

6. Сопоставить точность вырезанных деталей и отверстий, оставшихся после вырезки.

7. Дать рекомендации по устранению причин, снижающих точность процесса резки.

### ***Отчет о работе***

Отчет о работе должен содержать:

1) название, цель и содержание работы;  
2) описание оборудования, инструмента, эскиз и характеристику заготовки;

3) геометрический план обрабатываемой поверхности заготовки, эскиз операции, схему расположения заготовки на столе ЛТУ. На схеме показать базирование заготовки, движение лазерного луча, режим резки;

- 4) таблицы с результатами измерений и расчетов;
- 5) расчеты статистических характеристик распределения размеров;
- 6) графики практического распределения размеров;
- 7) сопоставление точности вырезанных деталей и оставшихся после вырезки отверстий, вывод о причинах, вызывающих погрешности резки, и рекомендации по проведению мероприятий по повышению точности операции резки.

### *Рекомендуемая литература*

1. Григорьянц, А. Г. Лазерная техника и технология : учеб. пособие для вузов. В 7 кн. Кн. 7. Лазерная резка металлов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : Высш. шк., 1988. – 127 с.
2. Основы технологии машиностроения : учеб. для вузов / под ред. В. С. Корсакова. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – М. : Машиностроение, 1977. – 416 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 3  |
| ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.....   | 4  |
| ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....  | 4  |
| Лабораторная работа № 1. ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ<br>ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....                              | 5  |
| Лабораторная работа № 2. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГЛУХИХ<br>ОТВЕРСТИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ .....                              | 8  |
| Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ<br>ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ .....                            | 14 |
| Лабораторная работа № 4. НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ<br>УСЛОВИЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ.....                                      | 19 |
| Лабораторная работа № 5. ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ<br>ОПЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ .....                         | 28 |
| Лабораторная работа № 6. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА<br>ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ<br>ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА..... | 33 |
| Лабораторная работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ<br>ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ.....                                 | 39 |

## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Методические указания к лабораторным работам

Составители:

МОРОЗОВ Валентин Васильевич  
ЖЕЛОБОВА Татьяна Александровна  
ЖДАНОВ Алексей Валерьевич

Редактор Т. В. Евстюничева

Технический редактор С. Ш. Абдуллаева

Корректор Е. В. Невская

Компьютерная верстка Л. В. Макаровой

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В. В. Морозов

Подписано в печать 29.12.16.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 2,56.

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.