

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электронной техники и технологии

**Г. М. Шахлевич, А. А. Костюкевич, Г. М. Пипко**

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики и радиоэлектроники в качестве пособия для специальностей 1-39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств», 1-39 02 02 «Проектирование и производство программно-управляемых электронных средств», 1-36 04 01 «Электронно-оптические системы и технологии», 1-36 04 01 «Программно-управляемые электронно-оптические системы»*

Минск БГУИР 2014

УДК 621.9.01-021.465(076.5)

ББК 34.63я73

ШЗ1

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра физической оптики Белорусского государственного университета,  
(протокол №5 от 18.12.2013);

декан приборостроительного факультета Белорусского национального  
технического университета, доктор физико-математических наук,  
профессор А. М. Маляревич

**Шахлевич, Г. М.**

ШЗ1

Формообразование и контроль качества поверхностей деталей. Лабораторный практикум : пособие / Г. М. Шахлевич, А. А. Костюкевич, Г. М. Пипко. – Минск : БГУИР, 2014. – 72 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-070-5.

Содержит лабораторные работы по исследованию точности и настроенности технологических процессов изготовления деталей РЭС, изготовления деталей РЭС холодной листовой штамповкой, влияния режимов механической обработки на шероховатость поверхности, электроэрозионной обработки и получения прецизионных металлических лент.

Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы с технологическим оборудованием, специализированной оснасткой, измерительными приборами и инструментами по учебным дисциплинам «Технология деталей радиоэлектронных средств», «Технология обработки материалов».

**УДК 621.9.01-021.465(076.5)**

**ББК 34.63я73**

**ISBN 978-985-543-070-5**

© Шахлевич Г. М., Костюкевич А. А.,  
Пипко Г. М., 2014

© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Лабораторная работа №1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И НАСТРОЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ .....	5
Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКОЙ.....	18
Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ.....	32
Лабораторная работа №4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	46
Лабораторная работа №5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Штампы механического действия для холодной листовой штамповки.....	68
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Шероховатость поверхности и качества точности отливок.....	69
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Шероховатость поверхностей и качества точности деталей, обрабатываемых давлением.....	70
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Шероховатость поверхности и качества точности при обработке деталей резанием.....	71

## ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие предназначено для методического обеспечения лабораторных занятий по следующим учебным дисциплинам: «Технология обработки материалов» специальности «Электронно-оптические системы и технологии»; «Технология деталей РЭС» специальности «Проектирование и производство РЭС»; «Технология электронно-оптических систем» специальности «Программно-управляемые электронно-оптические системы»; «Технология деталей электронных средств» специальности «Проектирование и производство программно-управляемых электронных средств».

В результате изучения указанных дисциплин студент должен:

**знать:**

- организационно-технические особенности различных типов производства;
- технологические возможности современных методов обработки материалов, технико-экономические характеристики оборудования, оснастки и станочных приспособлений;
- основы проектирования ТП обработки материалов и изготовления типовых деталей конструктивной базы ЭОС и РЭС;
- причины производственных погрешностей и приемы их устранения;
- типовые ТП изготовления специфических деталей ЭОС и РЭС;

**уметь:**

- анализировать исходные данные для проектирования технологических процессов;
- выбирать оптимальный метод обработки конкретного материала с учетом типа производства, программы выпуска и других организационно-технических факторов;
- выбирать аналог ТП и проектировать индивидуальный техпроцесс;
- оформлять результаты проектирования в виде комплекта технологической документации.

Предлагаемые лабораторные работы способствуют закреплению и углублению теоретических знаний, приобретению практических навыков работы с технологическим оборудованием, специализированной оснасткой, измерительными приборами и инструментами.

Данное пособие также может быть использовано при проведении лабораторных занятий по учебным дисциплинам «Материалы и технология деталей» специальности «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС», «Элементная база, материалы конструкций, технология деталей аппаратных средств обеспечения безопасности» специальности «Техническое обеспечение безопасности».

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И НАСТРОЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

**Цель работы:** изучение методов анализа точности изготовления деталей и настроенности технологических процессов (ТП). Овладение навыками проведения измерений и расчетов при исследовании точности и настроенности ТП экспериментально-статистическим методом. Исследование точности и настроенности ТП изготовления деталей обработкой резанием.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

##### Производственные погрешности, причины их возникновения, законы распределения

В процессе изготовления изделий невозможно обеспечить абсолютную тождественность их выходных параметров. При любом неизменном ТП изготовления партии деталей одним и тем же рабочим на одном и том же оборудовании появляются производственные погрешности, например колебания геометрических размеров или физических параметров изделий.

В общем случае под производственными погрешностями понимают отступления от номинальных данных, указанных в чертежах, нормалях, ТУ и другой технической документации, которые возникают при изготовлении деталей и сборке изделий.

Производственные погрешности подразделяются на систематические и случайные.

Систематической называется погрешность, которая в процессе исследований остается постоянной или же изменяется по определенному закону.

Случайная погрешность принимает различные значения под влиянием случайных факторов, поэтому определить заранее точное ее значение не представляется возможным.

Систематические погрешности вызываются:

- методическими причинами, возникающими из-за ограниченных возможностей выбранного метода изготовления детали или контроля ее параметров (например: погрешность измерительного инструмента, плохая проработка конструкции изделия и др.);
- деформацией и износом оборудования, оснастки и инструмента;
- температурными воздействиями на деталь или сборочную единицу, возникающими в процессе их изготовления.

Случайные производственные погрешности связаны с неоднородностью материала заготовки (например по твердости), погрешностью измерений, отклонениями параметров комплектующих изделий, колебаниями технологических режимов, субъективными данными рабочих и т. п.

Для описания производственных погрешностей изготовления деталей РЭС используются три закона: нормальный, равновероятный и обобщенный типа  $A$  (табл. 1.1). Нормальному закону чаще всего подчиняется распределение погрешностей в том случае, когда производство изделий носит массовый характер, при автоматически работающем оборудовании и отсутствии факторов, вызывающих систематические погрешности. При равномерном изменении во времени доминирующей систематической погрешности (например износ инструмента) применяют равновероятный закон распределения. Если распределение исследуемой совокупности погрешностей сильно отличается от нормального, используют обобщенный закон типа  $A$ .

### **Методы анализа производственных погрешностей**

Определение законов распределения производственных погрешностей производится экспериментально-статистическим методом. Он основан на получении и обработке большого количества наблюдений, характеризующих погрешности. Метод позволяет определить суммарную технологическую погрешность, которая возникает в результате взаимодействия ряда факторов, но не дает возможности выявить причины ее возникновения.

Расчетно-аналитический метод основан на выявлении функциональных зависимостей между производственными погрешностями и причинами их возникновения. В результате сочетания этих методов появились расчетно-статистический, корреляционный и другие методы анализа производственных погрешностей.

### **Расчетно-аналитический метод оценки точности технологических процессов**

Все аналитические методы предполагают, что зависимость между погрешностями и причинами, их вызывающими, известна в явном аналитическом виде. Пусть известна функциональная связь между каким-либо выходным (конструкторским или эксплуатационным) параметром изделия  $y$  и параметрами  $q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) ТП его изготовления:

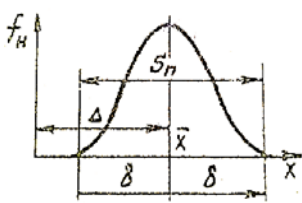
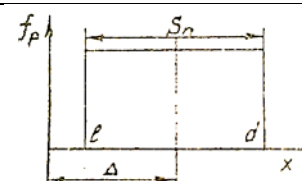
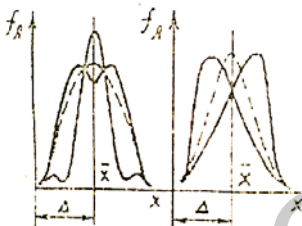
$$y = f(q_1, q_2, \dots, q_n). \quad (1.1)$$

Всякие отклонения  $y$  и  $q_i$  будут соответственно производственными погрешностями изделия и ТП его изготовления. Предположим, что производственные погрешности изделия – это сумма составляющих, вызываемых случайными и систематическими погрешностями ТП. Если среди случайных погрешностей нет доминирующих, величины  $q$  взаимно независимы и функция  $f$  непрерывна (имеет производные при любых  $q$ ), то полный дифференциал

$$dy = \frac{\partial y}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial y}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial q_n} dq_n. \quad (1.2)$$

Таблица 1.1

## Характеристики основных законов распределения производственных погрешностей

Закон распределения	График функции	Плотность распределения	Полное поле рассеяния при вероятности 0,9973	Параметры распределения
Нормальный (Гаусса)		$f_H(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\}$	$2\delta = 6\sigma$	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$ $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}}$
Равновероятный		$f_P(x) = \frac{1}{d-e}$	$3,464 \cdot \sigma$	$\bar{x} = \frac{d+e}{2}$ $\sigma = \frac{d-e}{2\sqrt{3}}$
Обобщенный, типа A		$f_A(x) = f(x) - \frac{r_3}{6} f^3(x) + \frac{r_4-3}{24} f^4(x)$	$t \cdot \sigma$	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$ $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}}$ $\alpha = r_3; \tau = r_4$

Очевидно, что  $dy$  и  $dq_i$  будут именно производственными погрешностями изделия и параметров ТП его изготовления. Переходя от дифференциалов к конечным приращениям, т. е. полагая  $dq_i \approx \Delta q_i$ , что допустимо при малых  $\Delta q_i$ , из (1.2) получим выражение абсолютной погрешности  $\Delta y$ :

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial q_1} \Delta q_1 + \frac{\partial y}{\partial q_2} \Delta q_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial q_n} \Delta q_n. \quad (1.3)$$

Разделив (1.3) на (1.1), определим относительную погрешность изделия  $\Delta y/y$  как функцию относительных погрешностей  $\Delta q/q$  параметров ТП его изготовления:

$$\frac{\Delta y}{y} = A_1 \frac{\Delta q}{q_1} + A_2 \frac{\Delta q}{q_2} + \dots + A_n \frac{\Delta q}{q_n}, \quad (1.4)$$

где  $A_i$  – весовые коэффициенты, характеризующие меру влияния составляющих (вклад) погрешностей ТП  $\Delta q/q$  на выходную погрешность изделия и  $\Delta y/y$ .

Значения  $A_i$  в линейном уравнении погрешности выходного параметра изделия (1.4) могут быть определены как аналитическим путем, так и экспериментально. Используя метод частных производных, получим

$$A_i = \frac{\partial f(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f(q_1, q_2, \dots, q_n)}. \quad (1.5)$$

Те же значения  $A_i$  можно получить экспериментально, используя, например, метод малых приращений:

$$A_i = \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\frac{\Delta q_i}{q_i}}{q_i}}. \quad (1.6)$$

Поскольку значения погрешностей  $\Delta y/y$  и  $\Delta q/q$  представляют собой случайные величины, то оценивают среднее значение  $\Delta y/y$  как математическое ожидание производственной погрешности изделия:

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right) \approx \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n} \cdot \frac{\Delta q_i}{q_i}. \quad (1.7)$$

Если входные параметры ТП, например  $x$  и  $z$ , имеют между собой корреляционную связь, то половину поля рассеяния выходного параметра изделия  $\delta_y$  можно выразить

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \cdot K_i^2 \cdot \delta_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n 2 \cdot r_{ij} \cdot A_i \cdot A_j \cdot K_i \cdot K_j \cdot \delta_i \cdot \delta_j}, \quad (1.8)$$

где  $K_i, K_j$  – коэффициенты относительного рассеивания параметров  $i, j$ , определяемые как  $K_i = 3\sigma_i / \delta_i(\text{ТУ})$ ;

$\sigma_i$  – среднее квадратическое отклонение  $i$ -го параметра;

$\delta_i(\text{ТУ})$  – половина поля допуска  $i$ -го параметра, заданного техническими условиями;

$r_{ij}$  – коэффициент корреляции взаимосвязанных параметров;

$\delta_i, \delta_j$  – половина полей допуска реальных отклонений параметров;

$A_i, A_j$  – весовые коэффициенты параметров  $i, j$ .

Чем больше статистический материал, тем выше эффективность описанного метода.



## Экспериментально-статистический метод анализа точности и настроенности ТП

На первом этапе анализа производственных погрешностей этим методом выбирается объект исследования, определяется объем экспериментальных данных и назначаются средства технического контроля. Основным требованием к объекту является однородность экспериментальных данных. Объем экспериментальных данных определяется требуемой точностью анализа. Измерительные средства должны выбираться так, чтобы полная погрешность измерений не превышала 10 % от допуска на изменяемый параметр.

На втором этапе производится наблюдение изучаемого параметра, обработка данных и анализ результатов. Экспериментальные данные, отражающие закономерности ТП, заносятся в протокол испытаний. Для удобства вычислений их предварительно группируют в интервалы. Количество интервалов  $K$  и их ширина  $C$  определяются по формулам

$$K \leq 5 \cdot \lg N, \quad C = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K}, \quad (1.9)$$

где  $N$  – число измерений;

$X_{\max}$  и  $X_{\min}$  – максимальное и минимальное значения параметра.

Границы интервалов определяются путем последовательного прибавления к  $X_{\min}$  ширины интервала  $C$ . Для удобства интервальный ряд записывается в форме табл. 1.2.

Ряды распределения производственных погрешностей получают большую наглядность, если их изобразить графически, как показано на рис. 1.1, в виде гистограмм или полигона по данным табл. 1.2. При построении гистограммы каждый интервал представляется на оси абсцисс прямоугольником с основанием, равным ширине интервала, и высотой, равной частоте. Соединив ломаной линией высоты, восстановленные из середины основания всех прямоугольников, получим полигон распределения.

Для упрощения расчетов параметров законов распределения используются начальные, центральные и основные моменты. Начальным моментом ряда распределения  $h$ -го порядка относительно условного начала  $a_0$  называется сумма произведений отклонений разрядных значений от  $a_0$  в степени  $h$  на соответствующую частоту  $n_i$ :

$$v_h = \frac{\sum_{i=1}^k \left( \frac{X_i - a_0}{c} \right)^h \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (1.10)$$

$$v_1 = \frac{1}{c} (\bar{x} - a_0). \quad (1.11)$$

Статистическая сводка экспериментальных данных

№ интервала	Границы интервала $X_H^i \dots X_K^i$	Середина интервала	Частота	Накопленная частота	Частость
1	$X_{\min} \dots X_{\max} + C$	$X_{\min} + C/2$	$n_1$	$n_1$	$m_1$
2	$X_{\min} + C \dots X_{\max} + 2C$	$X_{\min} + 3C/2$	$N_2$	$n_1 + n_2$	$m_1$
...	...	...	...	...	...
K	$X_{\max} - C \dots X_{\max}$	$X_{\max} - C/2$	$N_K$	$n_1 + n_2 + \dots + n_K$	$m_K$

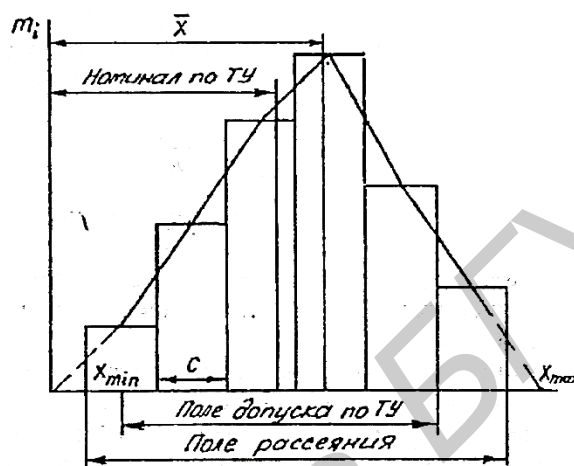


Рис. 1.1. Гистограмма и полигон распределения статистических данных

За условное начало принимают середину того интервала, в котором частота наибольшая. Момент  $\mu_h$ , вычисленный относительно среднего значения случайной величины, называется центральным:

$$\mu_h = \frac{\sum_{i=1}^k \left( \frac{x_i - \bar{x}}{c} \right)^h \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}; \quad (1.12)$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{i=1}^k \left( \frac{x_i - \bar{x}}{c} \right)^2 \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} = \frac{\sigma^2}{c^2}; \quad (1.13)$$

$$\sigma = c\sqrt{\mu_2}. \quad (1.14)$$

Основной момент ряда распределения  $h$ -го порядка равен отношению центрального момента этого порядка к среднему квадратическому отклонению в степени  $h$ :

$$\tau_h = \frac{\mu_h}{\sigma^h} = \frac{\mu_h}{\sqrt{\mu_2 \cdot c^h}}. \quad (1.15)$$

На основании полученных данных, гистограммы и полигона распределений делается предположение о законе, которому могут подчиняться анализируемые величины. Поскольку между теоретической кривой и реальным распределением неизбежны расхождения, то необходимо определить, являются ли они случайными (например, из-за малого объема наблюдений) или вызваны несоответствием указанных совокупностей. Для этого применяют критерий согласия Пирсона  $P(\chi^2)$ , который представляет вероятность того, что случайная величина

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{(n_i' - n_i)^2}{n_i'} \right\} \quad (1.16)$$

примет значение, превосходящее некоторую величину  $\chi_0^2$  ( $n_i$  и  $n_i'$  – практические и теоретические частоты распределения производственных погрешностей). Расчет величины  $\chi^2$  проводится в зависимости от предполагаемого закона распределения. По найденному значению  $\chi^2$  и числу степеней свободы находится вероятность  $P(\chi^2)$  того, что  $\chi^2$  превзойдет табличное значение  $\chi_0^2$ .

Число степеней свободы

$$m = k - 1 - f - 1, \quad (1.17)$$

где  $k$  – число интервалов;

$f$  – число параметров закона распределения.

Согласно (1.18) для нормального распределения  $m = k - 3$ ; для равновероятного  $m = k - 2$  и для типа  $A$   $m = k - 5$ .

Границей между случайным и существенным расхождением обычно берется 5%-й уровень значимости, т. е. при  $P(\chi^2) \geq 0,05$  отклонения между статистическими данными и теоретической кривой являются случайными и предполагаемый закон распределения достоверно описывает данные измерений. В ином случае расхождение считается существенным и необходимо подобрать другой закон распределения.

Значения критерия согласия Пирсона  $P(\chi^2)$  находятся по известным  $\chi^2$  и числу степеней свободы  $m$  из специальных таблиц [2].

Установление закона, которому подчиняются распределения производственных погрешностей исследуемого параметра, позволяет определить коэффициент технологической точности изготовления изделий  $T_n$  и смещение уровня настроенности ТП от середины поля допуска  $E$  по формулам

$$T_n = \frac{2\delta(\gamma)}{S_n}; \quad (1.18)$$

$$E = \frac{\bar{x} - B_{cp}(T\gamma)}{2\delta(\gamma)}, \quad (1.19)$$

где  $B_{cp}(TU)$  и  $\delta(TU)$  – величины номинального значения параметра и половины поля допуска на изучаемый параметр изделия по техническим условиям.

Технологический процесс считается настроенным (удовлетворительным) при  $T_{п} \geq 0,9$  и  $|E| \leq 0,05$ . В этом случае при подчинении распределения производственных погрешностей нормальному закону брак не превысит 0,9 %.

### Измерение размеров деталей с помощью штангенциркуля и микрометра

Штангенциркуль является универсальным измерительным инструментом, позволяющим с высокой точностью (до 0,01 мм) определять линейные (внутренние и наружные) размеры деталей, глубины и диаметры отверстий. Главными достоинствами штангенциркуля являются простота его использования (прибор реализует прямой метод измерения), доступность и возможность эксплуатации в широком температурном диапазоне (10–40 °С).

Согласно ГОСТ 166-89 «Штангенциркули. Технические условия», существует 4 основных типа штангенциркулей, отличающихся конструкцией (конфигурацией и взаиморасположением измерительных поверхностей): двусторонние штангенциркули типа I, односторонние штангенциркули типа Т-1, двусторонние штангенциркули типа II, односторонние штангенциркули – типа III. На рис. 1.2 представлена конструкция и внешний вид двустороннего штангенциркуля типа I. Основными конструктивными элементами штангенциркуля являются штанга 1 с рабочей поверхностью 5 и шкалой 9, рамка 2, зажим рамки (зажимающий элемент) 3, нониус (отсчетное устройство прибора) 4, глубиномер 6, губки 7 и 8, предназначенные для измерения внутренних и наружных размеров соответственно.

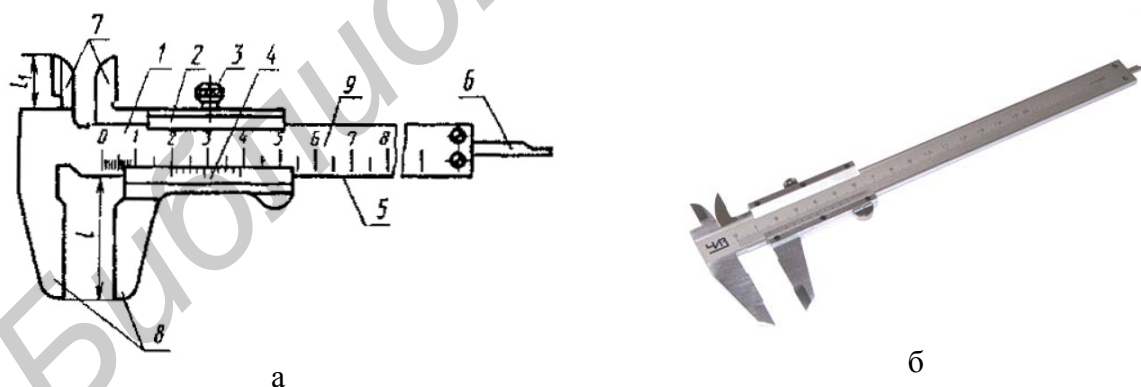


Рис. 1.2. Конструкция и внешний вид двустороннего штангенциркуля

В соответствии с ГОСТ 166-89 различают также нониусные (маркировка ШЦ), стрелочные (циферблатные) (маркировка ШИК) и электронные (цифровые) (маркировка ШЦЦ) штангенциркули (рис. 1.3). Все они имеют одинаковую конструкцию и различаются лишь типом отсчетного устройства. Штангенциркули типа ШИК используются в том случае, когда отсчет по нониусу за-

труднен или имеется потребность в более точных результатах. Штангенциркули с отсчетным устройством цифрового типа позволяют отображать измерительную информацию в цифровом коде с указанием знака; запоминать результаты последних измерений; автоматизировать процесс измерения путем подключения к компьютеру, последующей обработки, протоколирования и сохранения результатов.

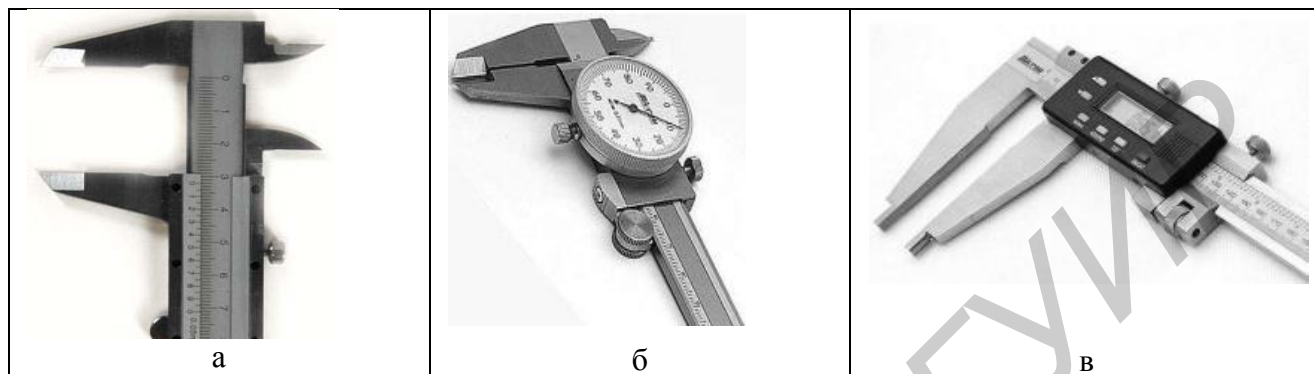


Рис. 1.3. Разновидности штангенциркулей по типу отсчетного устройства:  
а – нониусные; б – стрелочные; в – цифровые

Перед тем как приступить непосредственно к измерениям, штангенциркуль следует проверить на точность. Для этого необходимо совместить основные (широкие) губки инструмента, расположенные снизу. При этом для нониусных штангенциркулей должны совпасть нулевые отметки двух шкал – подвижной нониусной и неподвижной рабочей миллиметровой, а девятнадцатый штрих миллиметровой шкалы должен совместиться с десятым штрихом на нониусе; стрелка на циферблате стрелочного прибора должна указать на нулевую отметку, а на дисплее электронного штангенциркуля должна отобразиться цифра «0».

Для того чтобы измерить внешний размер детали, необходимо плотно зажать ее между основных (нижних) губок (рис. 1.4, а). Штангенциркуль при этом следует держать в правой руке (четыре пальца обхватывают штангу, большой палец лежит на рамке). Рамка перемещается большим пальцем и по достижении верного расстояния между губками, соприкасающимися с измеряемой поверхностью, фиксируется с помощью зажима большим и указательным пальцем правой руки. Перед считыванием результата необходимо убедиться в том, что губки заняли правильное положение: перекосы отсутствуют, а при перемещении детали между ними соблюдается нормальность усилия (деталь проходит между измерительными поверхностями, легко контактируя с ними).

Внутренние размеры детали измеряют с помощью заостренных губок штангенциркуля (рис. 1.4, б). Для этого достаточно привести их в сомкнутое состояние и поместить в измеряемую деталь. После этого вспомогательные губки разводятся. Перед определением результата проверяют соблюдение тех же условий, что и при считывании показаний при измерении наружных размеров.

Для определения глубины отверстия достаточно поместить в него расположенный на торце штангенциркуля глубиномер (рис. 1.4, в). После этого необходимо начать раздвигать основные губки до тех пор, пока глубиномер не упрется в поверхность. Как только это произошло, можно считать показания прибора. Таким же образом определяются размеры выступов.

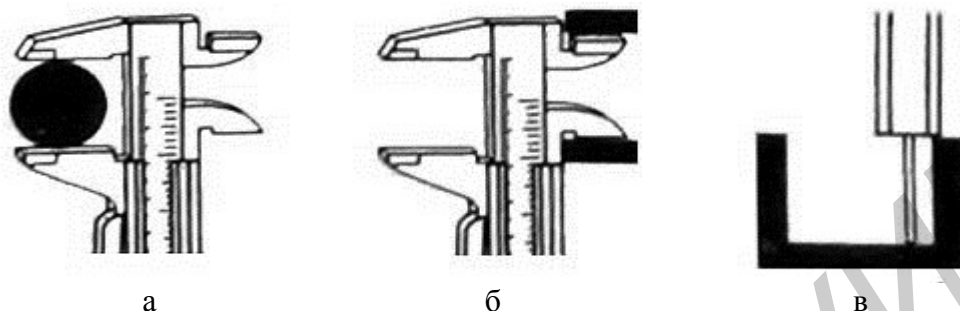


Рис. 1.4. Измерение размеров с помощью штангенциркуля

Чтобы определить показания нониусного штангенциркуля, его следует держать непосредственно перед глазами (положение «сбоку» категорически запрещено – оно приведет к появлению дополнительной погрешности). Поверхность шкалы нониуса имеет небольшой скос, предусмотренный для лучшего совмещения ее с основной шкалой – именно по взаиморасположению этих двух градуировок и определяется размер детали (рис. 1.5). В первую очередь оценивается число целых миллиметров, соответствующее значению деления основной шкалы, располагающегося с левой стороны от нулевой отметки нониуса и ближе всего к ней. Затем определяется количество долей миллиметра. На шкале нониуса находят штрих, совпадающий с одной из отметок основной шкалы. Если таких штрихов несколько, берут значение, ближайшее к нулю нониуса, – именно оно отображает количество десятых долей миллиметра. Складывая целую часть и десятые доли, получают полный размер детали или глубину отверстия.

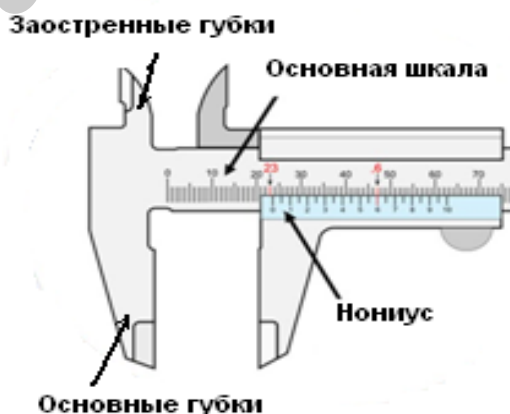


Рис. 1.5. Определение показания нониусного штангенциркуля

Считать показания со стрелочного прибора достаточно легко. «Целое» значение определяется по основной шкале прибора, количество же десятых или сотых долей указывает стрелка отградуированного циферблата. Затем показания складываются.

Работать с цифровым штангенциркулем еще проще – показания отображаются в удобном для пользователя формате на дисплее прибора.

Измерить размер изделий с точностью 0,01 мм можно с помощью микрометра. Существует много их модификаций, но самый распространенный – это гладкий микрометр типа МК-25, обеспечивающий диапазон измерений 0–25 мм с точностью 0,01 мм. Микрометром удобно измерять внешние размеры. Конструкция микрометра представлена на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Микрометр МК-25

Микрометр представляет собой скобу 1, с одной стороны которой находится опорная пятка 2, а с другой имеется стебель 3 с высокоточной резьбой, в которую закручивается микровинт. На стебле нанесена метрическая шкала 4, по которой выполняется отсчет миллиметров. На микровинте имеется вторая шкала 5 с 50 делениями, по которой отсчитываются сотые доли миллиметра. Сумма этих двух величин является измеренным размером.

Для того чтобы выполнить измерение микрометром, деталь 6 размещают между пяткой и торцом микрометрического винта и вращают по часовой стрелке за ручку трещотки 7 (находится на торце барабана микрометрического винта) до тех пор, пока трещотка не издаст три щелчка.

На стебле нанесено две шкалы с шагом 1 мм – основная оцифрованная 8 – через каждые 5 мм и дополнительная 9, сдвинутая относительно основной на 0,5 мм. Наличие двух шкал позволяет повысить тонность измерений. Отсчет показаний выполняется следующим образом. Сначала считывают, сколько целых, не закрытых барабаном, миллиметров получилось по оцифрованной – нижней шкале на стебле. Далее проверяют по верхней шкале наличие риски, расположенной правее от риски нижней шкалы. Если риски не видно, то переходят к снятию показаний со шкалы на барабане. Если риска просматривается,

значит, к целому числу полученных миллиметров добавляется еще 0,5 мм. Показания на барабане отсчитывают относительно прямой линии, нанесенной вдоль стебля между шкалами. Например, размер измеренной детали составляет: 13 мм по нижней шкале; на верхней шкале открытой метки, правее открытой на нижней шкале, – нет, значит, 0,5 мм добавлять не нужно, плюс 0,23 мм по шкале барабана, в результате сложения получаем  $13 + 0 + 0,23 = 13,23$  мм.

Микрометры с цифровым отсчетом результатов измерений удобнее в работе и позволяют измерять с точностью до 0,001 мм (рис. 1.7). Если, например, села батарейка, то цифровым микрометром можно выполнять измерения точно так же, как и гладким МК-25, т. к. имеется и система отсчета по делениям с точностью 0,01 мм.



Рис. 1.7. Микрометр с цифровым отсчетом результатов измерений

### Порядок выполнения работы

1. Получить у инженера в соответствии с заданием исследуемые образцы.
2. Произвести измерения заданного параметра образцов и результаты измерений занести в таблицу.
3. Используя программу для обработки статистических данных «HISTGRAM», рассчитать на ПЭВМ параметры распределения полученных данных, построить гистограмму.
4. Вычислить коэффициент технологической точности и смещение уровня настроенности.
5. Определить, настроен ли технологический процесс изготовления данной детали.
6. Оформить отчет по лабораторной работе.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Таблица результатов измерений.



4. Результаты расчета на ПЭВМ параметров закона распределения статистических данных, гистограмма.
5. Результаты расчета параметров настроенности ТП.
6. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Виды и причины возникновения производственных погрешностей.
2. Законы распределения производственных погрешностей.
3. Методы анализа производственных погрешностей.
4. Сущность расчетно-аналитического метода анализа производственных погрешностей.
5. Сущность экспериментально-статистического метода анализа производственных погрешностей.
6. Методика построения гистограммы и полигона распределений, расчет параметров закона распределения производственных погрешностей.
7. Параметры настроенности технологического процесса.

### **Литература**

1. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Т. III-7 : Измерения, контроль, испытания, диагностика / В. В. Ключев [и др.] ; под ред. В. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 2001. – 462 с.
2. Серафинович, Л. П. Статистическая обработка опытных данных : учеб. пособие / Л. П. Серафинович. – Томск : Изд-во ТГУ, 1990. – 75 с.
3. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства : учебник / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : Выш. шк., 2002. – 415 с.
4. Ланин, В. Л. Проектирование и оптимизация технологических процессов производства электронной аппаратуры : учеб. пособие / В. Л. Ланин, В. А. Емельянов, А. А. Хмыль. – Минск : БГУИР, 1998. – 196 с.
5. Глудкин, О. П. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА / О. П. Глудкин, В. Н. Черняев. – М. : Радио и связь, 1983. – 296 с.

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКОЙ

**Цель работы:** изучение механизма пластической деформации металлов. Ознакомление с прогрессивными методами обработки металлов давлением – холодной листовой штамповкой. Изучение оборудования и оснастки, применяемой для листовой штамповки, и методики расчета основных параметров процесса вырубки (пробивки), гибки, вытяжки. Разработка технологического процесса вырубки, пробивки и гибки.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

##### Механизм пластической деформации металлов

Пластическое изменение формы твердого тела называют пластической деформацией. Обработка металлов давлением, одним из видов которой является листовая штамповка, возможна благодаря пластичности металлов. Пластичностью называются свойства твердых тел изменять свою форму под действием внешних сил или внутренних напряжений, необратимо не разрушаясь.

Пластическая деформация металлов представляет собой сложный физико-механический процесс, обеспечивающий формоизменение металлической заготовки и изменение структуры и физико-механических свойств металла.

Количественно пластическая деформация оценивается относительным удлинением  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

где  $l_1$  – длина образца после его испытания на растяжение, мм;

$l_0$  – длина образца до испытания, мм.

Под действием внешних сил твердое тело сначала деформируется упруго, а затем пластически. Таким образом, пластической деформации всегда предшествует упругая. Упругая деформация возникает при относительно небольших значениях деформирующих сил (не превышающих предела упругости  $\sigma_p$ ) и является следствием упругих смещений атомов металла, происходящих в результате упругих изменений межатомных расстояний. По прекращении действия деформирующих сил атомы возвращаются на свои места и упругая деформация исчезает.

Пластическая деформация возникает вслед за упругой под действием значительных сил (обязательно превышающих предел упругости  $\sigma_p$ ). Она сохраняется и после снятия нагрузки. Однако в этом случае после разгрузки деформируемое тело несколько изменяет свои размеры за счет частичного вос-

становления первоначальных размеров под действием упругой деформации. Такое явление называется упругим последствием.

При пластическом деформировании зерна металла и их группы дробятся, перемещаются, поворачиваются, вытягиваются и, кроме того, некоторые части кристаллов смещаются относительно упругих. Эти смещения осуществляются главным образом скольжением (сдвигом) и двойникованием. При скольжении одна часть кристалла смещается параллельно относительно другой на расстояние, во много раз большее межатомных расстояний. Скольжение происходит по определенным кристаллографическим плоскостям, которые называются плоскостями скольжения. Обычно ими являются плоскости, имеющие наибольшую плотность размещения (упаковки) атомов. Например, в металлах с гранцентрированной кубической решеткой (ГПК) плоскостями скольжения являются плоскости октаэдра типа (111). Скольжение анизотропно. По одним кристаллографическим плоскостям оно идет значительно легче, чем по другим. При повышении температуры увеличивается количество возможных плоскостей скольжения.

Двойникование представляет собой смещение одной части кристалла симметрично остальному его объему. Наибольшую склонность к двойникованию обнаруживают кристаллы с ГПУ- и ОЦК-решетками. Оно сравнительно редко наблюдается при статическом нагружении и значительно чаще при деформировании ударом. С увеличением скорости деформации и понижением температуры склонность к двойникованию повышается. Плоскости двойникования обычно совпадают с плоскостями скольжения.

Пластическая деформация происходит не только вследствие сдвига внутри кристалла (зерна), но и в результате поворота, сдвига и относительного перемещения самих зерен. Такая межкристаллитная (межзеренная) пластическая деформация приводит к определенной ориентировке зерен, т. е. к появлению текстуры.

Аморфный механизм пластической деформации (диффузионная пластичность) характеризуется отсутствием порядка в последовательности перемещения атомов или молекул из одних мест устойчивого равновесия в другие. Он характерен для пластической деформации пластмасс.

### **Сущность процессов и технология листовой штамповки**

Листовая штамповка относится к холодной обработке давлением. Ее применяют для изготовления плоских, а также пространственных тонкостенных деталей из листового, ленточного полосового металла или неметаллических материалов (клеммы, шайбы, шасси, кожухи приборов, панели и др.).

Штампованные изделия отличаются достаточной точностью, хорошей взаимозаменяемостью. Для листовой штамповки характерны:

- высокая производительность, экономный расход металла и простота;

– широкие возможности и относительная простота механизации и автоматизации процесса обработки;

– массовость выпуска и низкая стоимость изготавливаемых изделий и др.

Операции листовой холодной штамповки подразделяются на:

– *разделительные*, при которых одна часть листа отделяется от другой;

– *формоизменяющие*, при которых изменяется пространственная форма заготовки;

– *комбинированные*, при которых сочетаются разделительные и формоизменяющие элементы обработки;

– *штамповборочные*, при которых отдельные штампованные детали соединяются обработкой давлением в общую конструкцию.

Классификация операций приведена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Классификация операций листовой штамповки

Листовые материалы для холодной штамповки предварительно нарезают на полосы или заготовки необходимых размеров. Резка полос является заготовительной операцией и осуществляется на рычажных, гильотинных, дисковых или вибрационных ножницах, а также на специальных отрезных штампах. Технология листовой штамповки обычно предусматривает: подготовку материала (очистка, смазка); изготовление заготовок (резка листов на полосы или заготовки, резка ленты и т. п.); деформирование металла (разделительные и формообразующие операции); термическую обработку – отжиг для снятия наклепа после холодного деформирования, закалку или химико-термическую обработку, если это необходимо, и т. п.; отделочные операции – удаление заусенцев, промывку, полирование, окраску, нанесение защитных или декоративных металли-

ческих покрытий (хромирование, никелирование и т. п.). Иногда в технологию включаются сварочные и сборочные операции.

Для удаления заусенцев применяют пескоструйную обработку с сухим и влажным абразивом. В последнем случае не требуется вентиляции. В качестве абразивной среды применяются электрокорунд, бой шлифовальных кругов. Фирма «Bosh» изготавливает установки для удаления заусенцев у небольших деталей посредством детонации газовой смеси и сгорания тонких заусенцев. В камеру, куда помещаются детали с заусенцами, впрыскивается кислородно-ацетиленовая смесь и воспламеняется. Кратковременная температура вспышки достигает 2000 °С, в ее пламени тонкие заусенцы сгорают и оплавляются.

Для удаления заусенцев применяются также химическое и электрохимическое травление.

Перед разработкой технологии обычно выполняют технологические испытания материала, форм и размеров изготавливаемой детали (испытания на изгиб, рез, перегиб, твердость). При разработке технологии сначала определяют формы и размеры заготовок: для плоских деталей размеры заготовки соответствуют их форме и размерам; для гнутых деталей формы и размеры заготовок определяют путем разворачивания (условной разгибкой) детали в плоскую.

Формулы для расчета размеров заготовок приведены на рис. 2.2. Значения коэффициента  $\chi$  приведены в табл. 2.1.

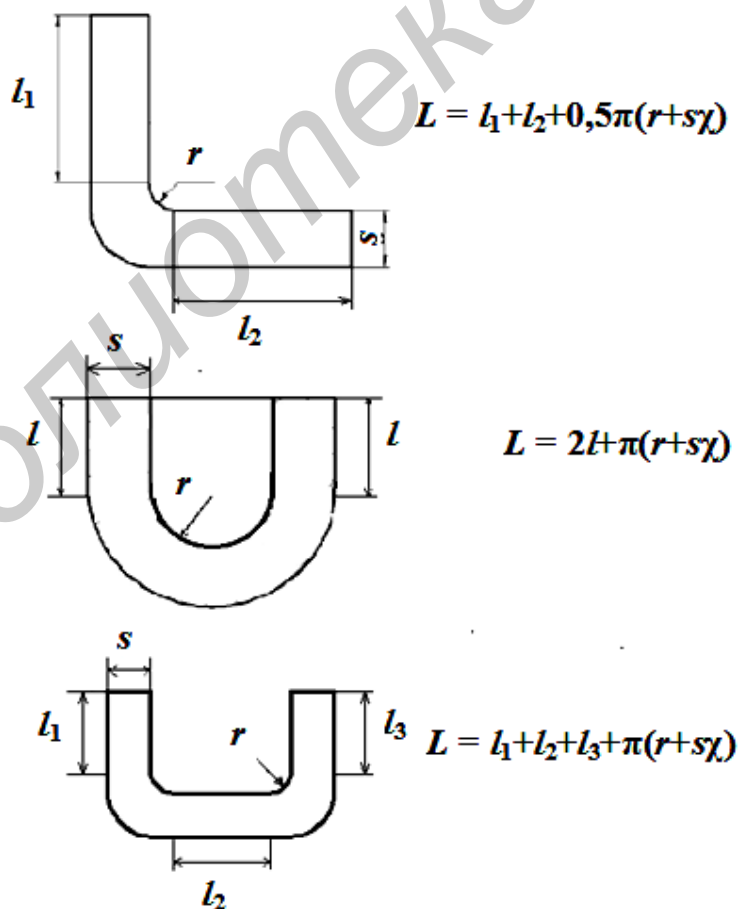


Рис. 2.2. Расчет размеров заготовки

Таблица 2.1

Значения коэффициента  $\chi$  для расчета размеров развертки

r/s	$\chi$	r/s	$\chi$	r/s	$\chi$
0,05	0,27	0,50	0,38	2,0	0,45
0,10	0,30	0,60	0,39	2,5	0,46
0,15	0,32	0,70	0,40	3,0	0,47
0,20	0,33	0,80	0,408	4,0	0,47
0,25	0,35	1,0	0,42	5,0	0,48
0,30	0,36	1,2	0,43	7,0	0,49
0,40	0,37	1,8	0,45	10,0	0,50

Определив размеры заготовки, устанавливают раскрой материала. Раскроем называют порядок расположения заготовок на листе, ленте или полосе. Выбор вида и способа раскроя зависит главным образом от формы необходимых заготовок и должен учитывать технологическую анизотропию исходного листового проката. Раскрой может быть прямой однорядовый (рис. 2.3, а) и многорядовый (рис. 2.3, б), наклонный (рис. 2.3, в), шахматный (рис. 2.3, г), встречный (рис. 2.3, д), комбинированный (рис. 2.3, е), с перемычками (рис. 2.3, ж) и без перемычек (рис. 2.3, з).

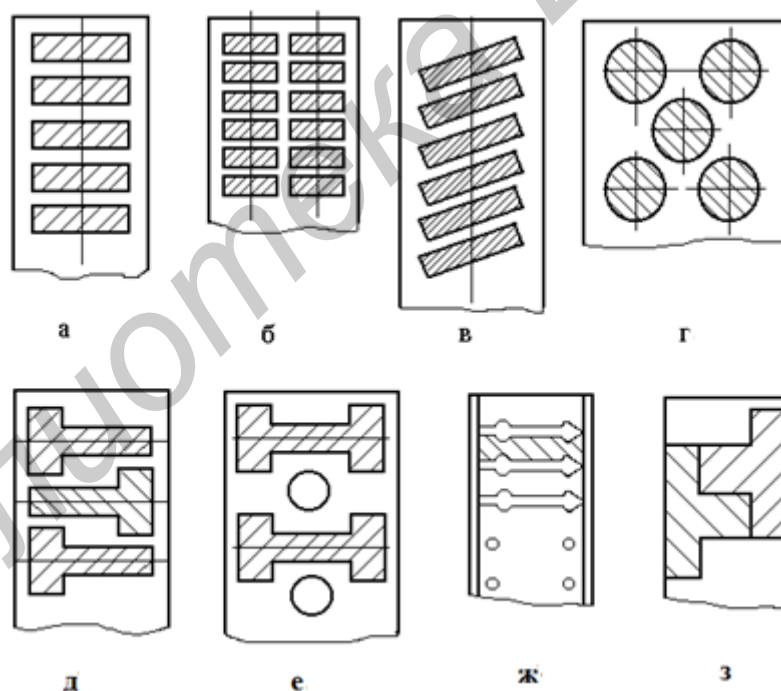


Рис. 2.3. Виды раскроя полосы

Выбирают такой раскрой, который наиболее экономичен. Рациональность и экономичность раскроя оцениваются коэффициентом использования материала  $\eta$ , который в общем случае определяется по формуле

$$\eta = \frac{F_d}{F_3} \cdot 100 \% , \quad (2.2)$$

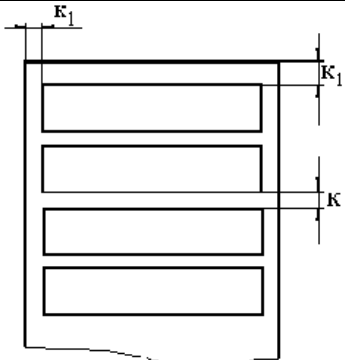
где  $F_d$  – площадь штампуемой детали, мм<sup>2</sup>;

$F_3$  – площадь заготовки, требуемой для изготовления детали, мм<sup>2</sup>.

Расстояние между соседними деталями, а также расстояние от края полосы выбирают в зависимости от толщины листа и механических свойств материала (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Значения перемычек при различной толщине листа конструкционной стали

Операционный эскиз	Толщина листа	Перемычка, мм	
	мм	к	к <sub>1</sub>
	0,3	0,6	0,7
	0,5	1,0	1,2
	1,0	1,25	1,5
	1,5	1,8	2,1
	2,0	2,0	2,4
	2,5	2,5	3,0

Установив вид раскроя, выбирают виды штамповочных операций. При этом руководствуются формами штампуемых деталей, их размерами, точностью размеров, технологическими особенностями выбранных операций и т. д. Так, например, при изготовлении вырубкой и пробивкой плоских деталей малой точности ограничиваются только этими операциями, при изготовлении более точных деталей назначают еще правку и зачистку. При изготовлении пространственных деталей назначают вырубку заготовок, затем гибку и вытяжку в один или несколько переходов или операций. После вытяжки обычно назначают обрезку. Для точных пространственных деталей после гибки или вытяжки назначают калибровку или чеканку для уточнения отделочных элементов формы и т. д.

Выбрав основные деформирующие операции, назначают вспомогательные операции, например: промежуточный отжиг, травление, промывку и т. п. В технологии обязательно предусматриваются операции промежуточного и окончательного контроля качества изготавливаемой детали. На основе установленных операций выбирают необходимое оборудование и применительно к нему разрабатывают конструкции штампов.

Выбирая оборудование, в первую очередь учитывают возможность осуществления на нем необходимых операций, производительность, возможность механизации и автоматизации процесса обработки на этом оборудовании, основные технические характеристики, наиболее важной из которых является усилие прессы.

Усилие штамповки (с учетом усилия, необходимого на сьем отхода или детали с пуансона, и усилия на проталкивание детали или отхода через матрицу) определяется по формуле

$$P_p = \frac{1,35 \cdot P_B}{1000}, \text{кН}, \quad (2.3)$$

Где  $P_B$  – расчетное усилие вырубки, пробивки или гибки.

Пресс выбирается из условия, чтобы его номинальное усилие было равно или больше расчетного усилия ( $P_B \leq P_{\text{ном}}$ ).

Усилие вырубки (пробивки) определяется по формуле

$$P_B = k \cdot L \cdot S \cdot \sigma_{\text{ср}}, \quad (2.4)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий состояние режущих кромок, неравномерность зазора между пуансоном и матрицей ( $k = 1,25$ );

$L$  – периметр вырубаемого (пробиваемого) контура, м;

$S$  – толщина материала, м;

$\sigma_{\text{ср}}$  – сопротивление материала срезу, Па.

Усилие гибки определяется по формуле

$$P_g = 1,25 \cdot \sigma_B \cdot L \times S \times k, \text{Н}, \quad (2.5)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности материала;

$L$  – периметр или длина гибки;

$S$  – толщина детали;

$k$  – коэффициент ( $k = 0,25$ ).

Значения сопротивления срезу и предела прочности некоторых материалов приведены в табл. 2.3.

Усилие вырубки или пробивки можно уменьшить за счет применения пуансона или матрицы со скошенными кромками (рис. 2.4) или применить штамп со ступенчатым расположением пуансонов, при этом при вырубке применяется штамп со скошенными режущими кромками у матрицы, при пробивке – со скошенными кромками у пуансона. При использовании штампа со ступенчатым расположением пуансонов усилие вырубки (пробивки) уменьшается за счет поочередной работы пуансонов.

Особенностью технологического процесса штамповки деталей из текстолита и гетинакса является то, что при толщине заготовок из гетинакса более 1,0 мм, а из текстолита более 1,5 мм обработку необходимо производить с подогревом (для текстолита всех марок и гетинакса марок В, Вс и Д до 30–90 °С, для гетинакса марок Ав, Бв, Вв, Гв, Дв – до 110–120 °С).

При вырубке материала с подогревом усадка размеров, совпадающих с продольным направлением листа, несколько меньше усадки размеров, совпадающих с поперечным направлением. Поэтому при штамповке деталей прямоугольной формы раскрой листа на полосы рекомендуется производить так, чтобы длина и ширина детали совпадали с длиной и шириной листа соответственно.



Таблица 2.3

## Сортамент и основные механические свойства штампуемых материалов

Материал	Размеры листа, полосы, ленты, мм			Механические свойства	
	Толщина S, мм	Длина L, мм	Ширина B, мм	$\sigma_b$ при растяже- нии, МПа	Сопротив- ление сре- за $\sigma_{ср}$ , МПа
Сталь тонколистовая углеродистая ГОСТ 9045-70 0,8 кп; 10 кп; 15 кп; 20 35; 10Г2А 30ХГСА; 45	0,2; 0,25; 0,3– 1,2 через 0,1; 1,4–2,2 через 0,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5; 4,0	1200 1400 1420 1500 1800 2000 3000	400, 600, 670, 710, 750, 800, 900, 1000, 1400	280 – 330 300 – 400 450 – 600 550 – 750	220 – 260 240 – 300 360 – 480 440 – 560
Лента стальная низ- коуглеродистая хо- лодной прокатки ГОСТ 503-71 М; ПН; Н	0,05; 0,06; 0,08 0,10; 0,12; 0,15 0,18; 0,2; 0,22 0,25; 0,28; от 0,3 до 1,95 через 0,05; от 2 до 3,6 через 0,1	До 4000	От 4 до 20 с шагом 1 для толщин до 0,4 мм; от 20 до 40 с шагом 2	350 – 500 420 – 600	280 – 400 330 – 480
Лента стальная хо- лодной прокатки кон- струкционная ГОСТ 19904-74 15; 20; 25; 45				450 – 800 500 – 850 550 – 600 770 – 1050	360 – 640 400 – 680 440 – 720 560 – 840
Листы и полосы ла- тунные ЛС59-1; Л68; Л65 ГОСТ 931-70	0,4–1,0 через 0,1; 1,5; 1,8; 2,0	Листы: 1500×600 1410×710; 1000×2000; Полосы: ширина 40–500		240 – 350	240 – 280
Ленты латунные Л68; Л63; ЛС 59-1 ГОСТ 2208-70	0,05–0,10 через 0,01; 0,12; 0,15; 0,18; 0,2; 0,25–1,1 через 0,05; от 1,1 до 2,0 через 0,1	До 175000 для толщины 0,05–0,09; 20000 – для толщины 0,1–0,5; 10000 – для толщины 0,55–1,0; 7000 – для толщины 1,1–2,0		300 – 380	240 – 300
Ленты медные М1; М2; М3; ГОСТ 1173- 70				210 – 300	170 – 240
Листы, полосы алю- миниевые А0; А1; А2; А3; А5; А0-1; Д1; Д16 и т. п. ГОСТ 13726-68	0,3; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 3,0; 6,0; 10	2000 3000 4000	400; 500; 600 800; 1000; 1200; 1400; 1500	70 – 150	55 – 120
Полосы и ленты из бериллиевой бронзы БрБ2; БрБ2,5 ГОСТ 1789-60	0,05–0,10 через 0,01; 0,12; 0,15; 0,18–0,22 через 0,02; 0,25–0,9 через 0,05; далее че- рез 0,1 мм	1000 2000 4000	Полосы: 50; 100; 300 Ленты: 10– 200 толщина до 0,15; 10–300 тол- щина 0,18– 0,45	300 – 360	240 – 280
Полосы и ленты из бронз БрОф6,5-0,15; БрОЦ4-5 ГОСТ 1761-70					300 – 500 600 – 700
Стеклотекстолит, в т. ч. фольгированный	–	–	–	–	120 – 150

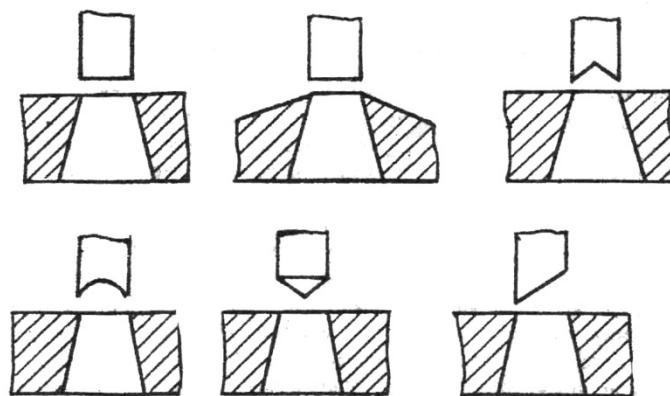


Рис. 2.4. Примеры матриц и пуансонов со скошенными кромками

При вырубке (пробивке) деталей из гетинакса и текстолита в целях повышения качества поверхности среза, предотвращения появления скола, трещин и расслоения материала в штампах необходимо применять сильные прижимные устройства. При вырубке гетинакса и текстолита применяют большую величину перемычек, чем для металла, т. к. вследствие хрупкости этих материалов малые перемычки растрескиваются и выкрашиваются.

### Оборудование и оснастка, применяемые при штамповке

Основным оборудованием для холодной штамповки являются кривошипные, гидравлические и пневматические прессы.

Кинематическая схема кривошипного прессы показана на рис. 2.5.

Он состоит из кривошипного вала 4, на один из концов которого насажен маховик 2, свободно вращаемый на валу электродвигателем 1 при помощи клиноременной передачи. Кривошипный вал шатуном 5 и винтом 7 соединен с ползуном 6 прессы,двигающегося в направляющих 8. Винт 7 позволяет регулировать положение ползуна 6, что дает возможность устанавливать на пресс штампы различной высоты. Маховик 2 соединяется с кривошипным валом прессы муфтой 3, включаемой нажатием педали 9.

Тормоз 10 быстро останавливает кривошипно-шатунный механизм прессы после разъединения. Современные прессы оснащаются автоматическими устройствами для подачи материала, удаления отходов и изделий. Для подачи заготовки может быть использовано валковое устройство 11 или клещевые, клинковые и другие механизмы. Отдельные заготовки насыпают в приемники-бункеры, откуда они поштучно попадают в штамп. Для удаления отштампованных изделий и отходов применяют пружинные выбрасыватели, механические руки (роботы), воздушное сдувание и т. д.

Внешний вид прессы кривошипного представлен на рис. 2.6.

Оснасткой к оборудованию холодной штамповки являются штампы.

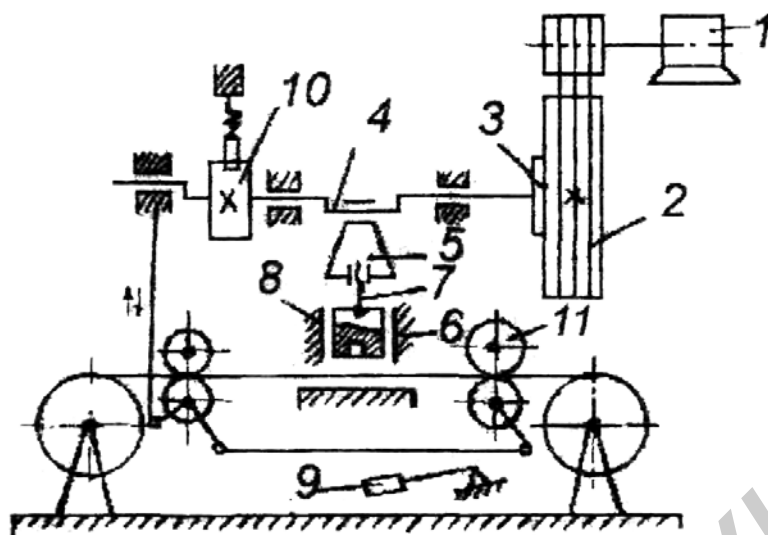


Рис. 2.5. Кинематическая схема кривошипного прессы



Рис. 2.6. Пресс однокривошипный модели K211ЧУ4

Штампы различают по трем признакам: технологическому, конструктивному и эксплуатационному.

По технологическому признаку штампы подразделяются по роду выполняемых операций (отрезные, вырубные, гибочные и т. п.), по количеству одновременно штампуемых деталей (одноместные и многоместные) и по совмещенности операций (однооперационные, многооперационные).

По конструктивному признаку штампы подразделяются на штампы с направляющими устройствами и без них (открытые), упрощенные и универсальные (переналаживаемые).

По эксплуатационному признаку штампы подразделяются по способу подачи материала (с ручной и автоматической подачей), по способу удаления отштампованной детали (со штамповкой на провал через отверстие в матрице,

выталкиванием детали в верхнюю часть штампа и удалением его жестким выталкиванием, со сдуванием детали сжатым воздухом и ручным удалением).

Простейший вырубной штамп (рис. 2.7) состоит из нижней 1 и верхней 2 плит, направляющих колонок 4, хвостовика 3, направляющих втулок 5, пуансонодержателя 8, сменного пуансона 6, жесткого съемника 9, направляющих планок 10, вырубной матрицы 7 и крепежных деталей 11, 12.

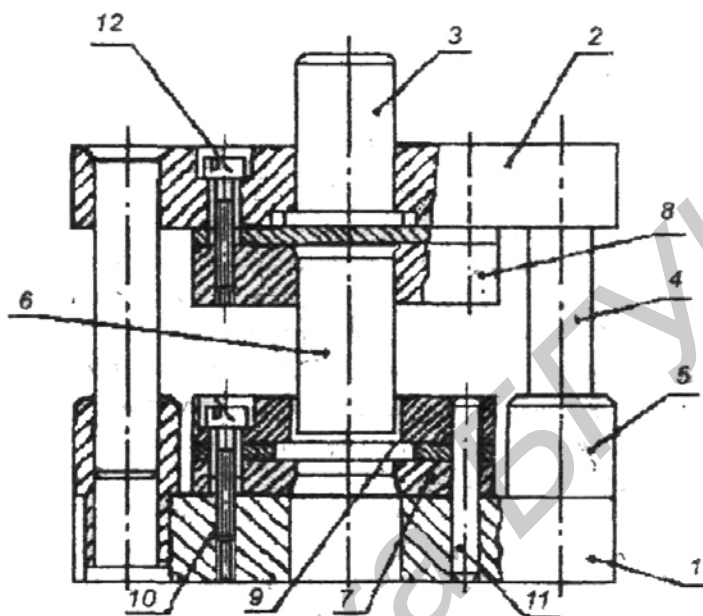


Рис. 2.7. Эскиз вырубного штампа

Внешний вид штампов изображен на рис. 2.8.



Рис. 2.8. Штампы

Конструкцию штампа выбирают согласно типу производства. При мелкосерийном производстве выбирают универсальные переналаживаемые штампы, обеспечивающие повышенную точность штамповки, быструю переналадку, обладающие повышенной стойкостью. В крупносерийном и массовом производстве применяют штампы с направляющими колонками и упрощенные штампы.

Они надежны в эксплуатации, удобны при установке, обладают повышенной стойкостью.

Для изготовления основных деталей штампов – пуансонов и матриц применяются инструментальные стали У7А 48А и т. д. или высокопрочные легированные стали марок ХВГ, Х12Ф1, Х12М (HRC 54–60), вольфрам-кобальтовые твердые сплавы марок ВК-8, ВК-15, ВК20, ВК25, ВК30 (HRC 85–89).

В некоторых случаях для изготовления пуансонов и матриц вытяжных и формовочных штампов может применяться резина марок 3311, 1847, отвержденные эпоксидные смолы марок ЭД-5, ЭД-6, Э-40.

### **Импульсные высокоскоростные виды штамповки**

В промышленности нашли применение беспрессовые методы штамповки ввиду ограниченных возможностей механических и гидравлических прессов:

- штамповка давлением ударной волны при взрыве взрывчатых веществ (ВВ) в воде (взрывная штамповка);
- штамповка воздействием высоковольтного электрического разряда в жидкостях (электрогидравлическая штамповка);
- штамповка импульсами магнитного поля высокой напряженности (магнитоимпульсная штамповка).

Взрывная штамповка применяется для изготовления крупных деталей (1,5–8 м) при толщине материала свыше 2 мм.

В основу электрогидравлической штамповки положен электрогидравлический эффект, открытый советским изобретателем Л. А. Юткиным в 1955 году. Энергия, необходимая для электрического разряда, накапливается в высоковольтной конденсаторной батарее (35–40 кВ). Накопленная энергия создает между электродами мгновенный разряд длительностью 0,04 мкс, вызывающий ударную волну в жидкости, которая деформирует заготовку.

Магнитоимпульсная штамповка характерна тем, что давление на деформируемую металлическую заготовку создается непосредственным воздействием импульсного магнитного поля без участия промежуточных твердых, жидких или газообразных сред. Это позволяет штамповать детали из полированных и лакированных заготовок без повреждения поверхности.

Магнитоимпульсная штамповка основана на создании в области обрабатываемой заготовки мощного импульсного магнитного поля. Это поле индуцирует вихревые токи противоположного направления в металлической заготовке, что приводит к появлению электромеханических сил взаимодействия, стремящихся оттолкнуть заготовку от магнитного индуктора. Магнитный импульс длится 10–20 мкс, создавая давление от 3500 до 39 000 кг·с/см<sup>2</sup>. Движущая заготовка с большой скоростью 300–400 м/с ударяется в матрицу, в результате чего возникают огромные силы соударения, деформирующие заготовку.

## **Оборудование, оснастка, инструмент, заготовки, применяемые при выполнении лабораторной работы**

1. Пресс однокривошипный марки К211ЧУ4.
2. Вырубные, пробивные, гибочные, комбинированные штампы.
3. Измерительный инструмент: штангенциркуль ШЦ-1 ГОСТ 166-03, линейка 1–200 мм ГОСТ 427-75.
4. Заготовки: штампованные детали РЭС и электронно-оптической аппаратуры.
5. Материалы: электрокартон.

### **Порядок выполнения работы**

1. Получить у лаборанта или преподавателя штампованные детали.
2. Рассчитать размеры развертки детали, используя формулы (2.3)–(2.5).
3. Произвести рациональный раскрой материала, рассчитать номинальную ширину полосы. Определить коэффициент использования материала.
4. Рассчитать усилие вырубки, гибки, необходимое для изготовления данной детали. Определить усилие штамповки. Выбрать по усилию штамповки необходимое оборудование, используя технические характеристики прессов (прил. 1).
5. Разработать маршрутный технологический процесс изготовления детали.
6. Ознакомиться с конструкцией однокривошипного прессы. Под руководством лаборанта произвести процесс штамповки детали из электрокартона.
7. Изучить конструкции штампов, имеющихся в лаборатории, ознакомиться с их особенностями.
8. Оформить отчет по лабораторной работе.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Чертеж детали.
3. Эскиз развертки детали.
4. Эскиз полосы с раскроем.
5. Расчеты размеров детали, полосы, коэффициента использования материала, усилий вырубки, гибки и штамповки, выбор оборудования.
6. Блок-схема техпроцесса изготовления детали.
7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Процесс пластической деформации.
2. Механизмы пластической деформации.
3. Преимущества холодной листовой штамповки.

4. Разновидности листовой штамповки.
5. Типы прессов для холодной листовой штамповки.
6. Принцип работы кривошипного пресса.
7. Виды операций, выполняемых с помощью листовой штамповки.
8. Виды раскроя полосы.
9. Как снизить усилие вырубки?
10. Материалы деталей штампов.
11. Особенности штамповки металлических материалов.
12. Классификация штампов.
13. Способы удаления заусенцев.

### Литература

1. Технология конструкционных материалов : учебник для вузов / А. М. Дальский [и др.]; под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 2005. – 512 с.
2. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Т. III-2 : Технология заготовительных производств / В. Ф. Мануйлов [и др.]; под ред. В. Ф. Мануйлова. – М. : Машиностроение, 1996. – 736 с.
3. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – М. : Машиностроение, 2007. – 576 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / А. М. Дальский [и др.]; под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 2006. – Т.1. – 912 с. ; Т. 2. – 944 с.

## Лабораторная работа №3

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

**Цель работы:** изучение сущности шероховатости поверхности и причин ее возникновения, параметров и условных обозначений шероховатости поверхности на чертежах, принципов выбора параметров для нормирования шероховатости. Ознакомление с оборудованием и изучение методики измерения шероховатости поверхности с помощью профилометра. Исследование влияния режимов резания на шероховатость поверхности деталей.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Состояние поверхности во многом определяет надежность, прочность, износ и коррозионную стойкость деталей. Качество поверхности характеризуется совокупностью физико-механических и химических свойств, а также геометрических отклонений реальной поверхности от номинальной.

*Реальная поверхность* – это поверхность, ограничивающая деталь и отделяющая ее от окружающей среды. Ее получают в процессе обработки.

*Номинальная поверхность* – это поверхность детали, изображенная на чертеже.

Геометрические отклонения реальной поверхности от номинальной характеризуются волнистостью, макро- и микронеровностями. Условно их различают по отношению шага  $S$  к высоте  $H$ . При  $S/H > 1000$  – макронеровности;  $S/H = 60-1000$  – волнистость;  $S/H < 50$  – шероховатость поверхности.

## Микрогеометрические отклонения поверхности

Микрогеометрические отклонения, или шероховатость поверхности, оцениваются на относительно малых участках реальной поверхности. Под шероховатостью понимают совокупность неровностей с относительно малыми шагами, выделенную с помощью базовой длины. Шероховатость оценивается по неровностям профиля поверхности, получаемого путем ее сечения плоскостью, перпендикулярной номинальной поверхности (рис. 3.1). ГОСТ 2789-73 устанавливает характеристики и параметры шероховатости и распространяется на поверхности изделий независимо от их материала и способа изготовления (исключение – ворсистые, пористые и аналогичные им поверхности). При определении параметров шероховатости не учитываются местные дефекты поверхности (раковины, трещины, вмятины, царапины и т. д.).

Стандарт устанавливает для количественной оценки шероховатости шесть параметров: три высотных ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ), два шаговых ( $S_m$ ,  $S$ ) и параметр относительной опорной длины профиля ( $t_p$ ).



Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y(x)| dx, \text{ приближенно } R_a = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i|, \quad (3.1)$$

где  $l$  – базовая длина;

$n$  – число измеренных точек профиля на базовой длине.

Базовая длина – это длина базовой линии, в пределах которой осуществляется оценка параметра шероховатости.

Базовая линия – это линия заданной геометрической формы, определенным образом проведенная относительно профиля и служащая для оценки геометрических параметров поверхности.

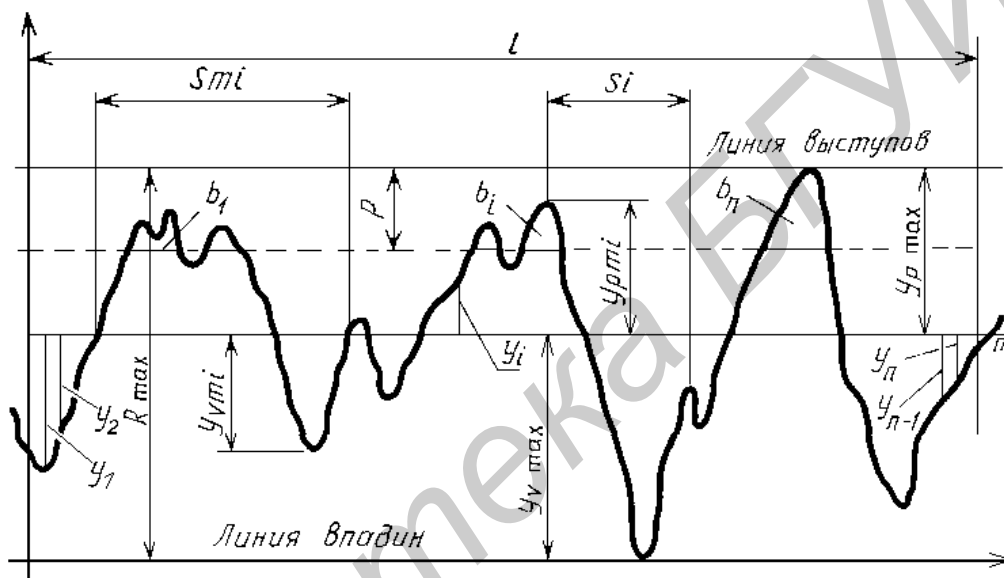


Рис. 3.1. Параметры шероховатости поверхности

Высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубины пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |Y_{ip\max}| + \sum_{j=1}^5 |Y_{jv\max}| \right), \quad (3.2)$$

где  $Y_{ip\max}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;

$Y_{jv\max}$  – глубина  $j$ -й наибольшей впадины профиля.

Наибольшая высота неровностей профиля  $R_{\max}$  – расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Средний шаг неровностей профиля  $S_m$  – среднее значение шага неровностей профиля по средней линии  $m$  в пределах базовой длины.

Средняя линия профиля представляет собой базовую линию, имеющую форму номинального профиля и проведенную так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально.

Средний шаг местных выступов профиля  $S$  – среднее значение шагов местных выступов профиля (по вершинам) в пределах базовой длины.

Относительная опорная длина профиля  $t_p$  – отношение опорной длины профиля  $\eta_p$  к базовой длине  $l$ :

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l} = \frac{\eta_p}{l}, \quad (3.3)$$

где  $b_i$  – опорная длина профиля, равная сумме длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией – эквидистантой средней линии в пределах базовой длины.

ГОСТ 2789-73 устанавливает числовые значения параметров шероховатости и базовой длины, а также соотношения между этими параметрами и базовой длиной, на которой они оцениваются. Рекомендуемые стандартом соотношения высотных параметров и базовой длины даны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры и классы шероховатости поверхности

Класс	Параметр шероховатости		Базовая длина, мм
	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	
1	80; 63; <u>50</u> ; 40	320; 250; <u>200</u> ; 160	8,0
2	40; 32; <u>25</u> ; 20	160; 125; <u>100</u> ; 80	
3	20; 16; <u>12,5</u> ; 10	80; 63; <u>50</u> ; 40	
4	10,0; 8,0; <u>6,3</u> ; 5,0	40; 32; <u>25</u> ; 20,0	2,5
5	5,0; 4,0; <u>3,2</u> ; 2,5	20,0; 16,0; <u>12,5</u> ; 10,0	
6	2,5; 2,0; <u>1,6</u> ; 1,25	10,0; 8,0; <u>6,3</u>	0,8
7	1,25; 1,0; <u>0,8</u> ; 0,63	<u>6,3</u> ; 5,0; 4,0; <u>3,2</u>	
8	0,63; 0,5; <u>0,4</u> ; 0,32	<u>3,2</u> ; 2,5; 2,0; <u>1,6</u>	
9	0,32; 0,25; <u>0,2</u> ; 0,16	<u>1,6</u> ; 1,25; 1,0; <u>0,8</u>	0,25
10	0,16; 0,125; <u>0,1</u> ; 0,08	<u>0,8</u> ; 0,63; 0,5; <u>0,4</u>	
11	0,08; 0,063; <u>0,05</u> ; 0,04	<u>0,4</u> ; 0,32; 0,25; <u>0,2</u>	
12	0,04; 0,032; <u>0,025</u> ; 0,02	<u>0,2</u> ; 0,16; 0,125; <u>0,1</u>	
13	0,02; 0,016; <u>0,012</u> ; 0,01	<u>0,1</u> ; 0,08; 0,063; <u>0,05</u>	0,08
14	0,01; 0,008;	<u>0,05</u> ; 0,04; 0,032; <u>0,125</u>	

Примечание. Предпочтительные значения параметров подчеркнуты.

В дополнение к количественным параметрам шероховатостей допускается нормирование качественной характеристики – направления неровностей. ГОСТ 2789-73 устанавливает следующие типы направлений неровностей: параллельный, перпендикулярный, перекрещивающийся, произвольный, кругообразный и радиальный. Направление неровностей определяется по отношению к линии, изображающей поверхность на чертеже, или к центру поверхности (кругообразный и радиальный тип).

Обозначение шероховатости поверхности на чертеже нормировано ГОСТ 2.309-73 с изменениями №3 от 12.06.2003 г. Условные обозначения шероховатостей приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Условные обозначения шероховатости поверхности

Элементы обозначения	Графическое изображение	Пояснение
Знак, принятый для обозначения шероховатости на чертеже		Знак условного обозначения шероховатости; распределение информации по зонам: 1 – вид обработки поверхности или другие дополнительные указания; 2 – условное обозначение направления неровностей; 3 – значение базовой длины, параметры шероховатости и их значения
		Знак, соответствующий конструкторскому требованию, чтобы поверхность была образована полным удалением поверхностного слоя материала (например, точением, шлифованием и т. д.). Следы необработанной поверхности не допускаются
		Знак, соответствующий условию нормирования шероховатости, когда метод образования поверхности чертежом не регламентируется; применение предпочтительно
		Знак, соответствующий требованию, чтобы поверхность была образована без удаления поверхностного слоя материала (например: литьем, штамповкой и т. д.). Следы зачистки поверхности не допускаются
		Если буквенное обозначение параметра не указано, то числовое значение относится к параметру $R_a$
Указание нормируемого параметра шероховатости		Буквенные обозначения параметров $R_z$ , $R_{max}$ , $S$ , $S_m$ и $t_p$ указывают перед их новыми значениями. Значения параметров $R_a$ , $R_z$ , $R_{max}$ указываются в микрометрах, параметров $S$ и $S_m$ – в миллиметрах, $t_p$ – в процентах от 1, уровня сечения $P$ для параметра $t_p$ – в процентах от $R_{max}$

Выбор параметров для нормирования шероховатостей должен производиться с учетом назначения и требуемых эксплуатационных свойств поверхности (табл. 3.3). Основным в большинстве случаев является нормирование высотных параметров. Из них наиболее информативен параметр  $R_a$ , который и определен стандартом как предпочтительный.

При назначении числовых значений параметров шероховатости необходимо учитывать возможность их обеспечения при использовании рациональных методов обработки поверхности. Так, шероховатость поверхностей деталей, получаемых литьем, определяется видом литья, свойствами литейного ма-

териала, состоянием поверхностей литейных форм и условиями кристаллизации расплава. Наилучшим качеством обладают поверхности деталей, получаемых литьем в металлические формы. За счет быстрого охлаждения расплава на гладких стенках формы формируется поверхностный слой с плотной, мелкозернистой структурой, без пор, раковин и микротрещин. Значения параметров шероховатости поверхностей отливок приведены в прил. 2.

Шероховатость поверхностей пластмассовых деталей, полученных методами литья и прессования, определяется состоянием поверхностей стенок литевых форм и форм для прессования.

При обработке деталей давлением (прокатка, волочение, ковка, штамповка и т. д.) шероховатость их поверхностей зависит в основном от состояния поверхности инструмента, свойств обрабатываемого материала, а также температурных условий. Например, прокат, изготовленный в холодном состоянии, имеет более качественную поверхность, чем горячекатаный.

При разделительных операциях холодной штамповки (пробивка, вырубка, калибровка, просечка и др.) происходит как срезание, так и скалывание материала. Шероховатость в зоне среза определяется состоянием режущих кромок пуансона и матрицы, величиной зазора между ними, физико-механическими свойствами материала детали. Шероховатость в зоне скалывания имеет значительно большую величину и определяется в основном физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. Возможные значения параметров шероховатости поверхностей деталей, получаемых операциями обработки давлением, приведены в прил. 3.

Таблица 3.3

Эксплуатационные свойства поверхности и обеспечивающая их номенклатура параметров шероховатости

Эксплуатационные свойства поверхности	Параметры шероховатости поверхности и характеристики, определяющие эксплуатационные свойства
Изломоустойчивость при трении Виброустойчивость Контактная жесткость Прочность соединения	$R_a(R_z), t_p$ , направление неровностей $R_a(R_z), S_m, S$ , направление неровностей $R_a(R_z), t_p$ $R_a(R_z)$
Прочность конструкций при циклических нагрузках Герметичность соединений Сопротивление в волноводах	$R_{max}, S_m, S$ , направление неровностей $R_a(R_z), R_{max}, t_p$ $R_a, S_m, t_p$

Причины возникновения шероховатости поверхности при механической обработке носят различный характер в зависимости от вида обработки. Так, при обработке лезвийным инструментом (точение, фрезерование, сверление, развертывание и т. д.) на шероховатость поверхности оказывает влияние состояние режущей кромки и геометрия режущего инструмента, режимы обработки (скорость и глубина резания, величина подачи и т. д.), а также физико-механические свойства обрабатываемого материала. При абразивной обработке

деталей (шлифование, полирование, хонингование, доводка и т. д.) шероховатость поверхности определяется также размером зерен абразивного материала. Для достижения высокого класса шероховатости такую обработку необходимо производить поэтапно, уменьшая на каждом последующем этапе толщину удаляемого слоя и размер абразивного зерна. Рекомендуемые значения параметров шероховатости поверхности для некоторых видов механической обработки приведены в прил. 4.

### Методы контроля шероховатости поверхности

Методы контроля шероховатости поверхности можно объединить в три основные группы: контроль шероховатости поверхности сравнением с рабочими образцами шероховатости; измерение параметров шероховатости бесконтактными методами и измерение параметров шероховатости контактными методами.

Наиболее простым способом оценки качества обработанной поверхности является ее сравнение с поверхностями рабочих образцов. Последние стандартизированы и выпускаются с шероховатостью разных классов, получаемой различными методами механической обработки. Образцы комплектуются в наборы по методам обработки. Визуальное сравнение позволяет давать заключение о соответствии или несоответствии испытываемой поверхности установленным образцам. Существенно уменьшает вероятность ошибки при оценке шероховатости поверхности применение двойных микроскопов сравнения, позволяющих при значительных увеличениях наблюдать в поле зрения окуляра одновременно участки поверхности образца и испытываемой детали.

К группе бесконтактных методов контроля шероховатости поверхности относятся методы измерения параметров шероховатости с помощью оптических приборов: интерференционный, светового сечения, теневой проекции, растровый и др.

Интерференционный метод измерения шероховатости с помощью специальных интерференционных микроскопов (МИИ-4, МИИ-2Н, МИИ-11) заключается в измерении высот неровностей профиля поверхности по искривлению интерференционных полос, наблюдаемых в поле зрения окуляра микроскопа. Диапазон измерений  $R_a$  этим методом – 0,16–0,008 мкм.

В методе светового сечения на исследуемую поверхность падает под углом  $\alpha$  узкий пучок света, формируемый с помощью проекционного микроскопа. На поверхности создается граница тени и света (световое сечение), подобная профилю сечения поверхности плоскостью. По конфигурации этой границы можно судить о расположении, форме и размерах неровностей на испытываемой поверхности. Наблюдение полученного светового сечения осуществляется с помощью второго микроскопа, расположенного под углом  $2\alpha$  относительно первого. Реализуется данный метод с помощью двойного микроскопа Линника МИО-11 и прибора светового сечения ГОС-2. Пределы измерения высотных параметров – 0,5–80 мкм и шаговых – 0,002–8,0 мм.

Метод теневой проекции является видоизменением метода светового сечения и удобен для измерения больших шероховатостей. Особенность его в том, что на контролируемую поверхность направляют пучок света, на пути которого вблизи поверхности располагают экран с прямоугольными краями. Границу тени при отражении светового пучка от поверхности, представляющую собой теневую картину профиля обследуемого ее участка, рассматривают через микроскоп и по ее конфигурации определяют параметры шероховатости. Диапазон измерения высотных параметров с помощью прибора теневой проекции ПТС составляет 140–320 мкм, погрешность 15 %.

В растровом методе измерения высот неровностей профиля на испытуемую поверхность накладывается стеклянная пластина со штрихами (т. е. растровой сеткой). При наклонном падении лучей отраженная картина растровой сетки накладывается на штрихи самой сетки и наблюдаются муаровые полосы. Для поверхности без неровностей муаровые полосы будут представлять собой систему темных и светлых прямых линий. При наличии неровностей они искривляются пропорционально масштабу проектируемого раstra. Горизонтальный и вертикальный масштабы можно изменять, что позволяет измерять неровности от единиц до сотен микрометров. Метод реализуется с помощью растрового измерительного микроскопа ОШИ.

Контактные методы измерения шероховатости поверхности основаны на ощупывании исследуемой поверхности алмазной иглой с радиусом закругления 10 мкм, которая совершает поступательное перемещение по определенной трассе. Во время перемещения игла совершает механические колебания, повторяющие профиль поверхности. Они преобразуются в электрический сигнал электромеханическим преобразователем и усиливаются. Параметры сигнала, подобные параметрам неровностей профиля поверхности, измеряют (профилометрирование) или записывают в выбранных вертикальном и горизонтальном масштабах (профилографирование). Соответственно приборы для непосредственного измерения  $R_a$  называют профилометрами и профилографами (запись профиля в виде профилограммы).

В промышленности применяют профилографы-профилометры мод. 201, 202, 252 и профилометры цехового типа мод. 253, 283, «Сейтроник» ПШ8-1(СС). С помощью этих приборов можно осуществлять контроль шероховатости прямолинейных (мод. 252, 283) и криволинейных (в т. ч. шариков и роликов) поверхностей (мод. 202, «Сейтроник» ПШ8-1(СС)) с погрешностью 10 %, а при использовании дополнительных устройств – 16 %.

### **Расчет параметров шероховатости при различных видах механической обработки**

На основании экспериментальных исследований выведены эмпирические зависимости для определения параметров шероховатости поверхностей при различных методах и условиях их обработки.

При получистовом и чистовом точении среднее арифметическое отклонение профиля определяется по формуле

$$R_a = k_0 \frac{S^{k_1} (90^\circ)^{k_4}}{\rho^{k_2} v^{k_3}}, \quad (3.4)$$

где  $S$  – подача (0,05–0,43 мм/об);

$v$  – скорость резания (71–282 м/мин);

$\rho$  – радиус при вершине резца (0,6–2 мм);

$\gamma$  – передний угол (+4–(–40));

$k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты (приведены в табл. 3.4).

При сверлении среднее арифметическое отклонение профиля боковой поверхности отверстия можно рассчитать по формуле

$$R_a = 6,3d^{0,25} v^{0,12} S^{0,41}, \quad (3.5)$$

где  $d$  – диаметр отверстия (12–25 мм);

$v$  – скорость резания (12–20 м/мин);

$S$  – подача (0,06–0,14 мм/об).

При торцовом фрезеровании

$$R_a = 4,38 \frac{S_z^{1,69} t^{0,15}}{v^{1,25} \rho^{0,14} \gamma^{0,46}}, \quad (3.6)$$

где  $S_z$  – подача на 1 зуб (0,08–0,6 мм/зуб);

$t$  – глубина резания (0,3–1,8 мм);

$v$  – скорость резания (18–44 м/мин);

$\rho$  – радиус при вершине резца (0,5–2,0 мм);

$\gamma$  – передний угол (5–20 °).

Таблица 3.4

Коэффициенты для расчета  $R_a$  при получистовом точении

Материал	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
Ст 3	0,01	0,65	0,6	0,5	1,9
Сталь 20	41,8	0,75	0,55	1,38	0,25
Сталь 45	7,0	0,05	0,65	0,36	0,15
Сталь 70	5,8	1,1	0,681	0,15	0,45

При развертывании отверстий среднее арифметическое отклонение профиля боковой поверхности отверстия

$$R_a = 0,1 \frac{d^{0,26} v^{0,89}}{S^{0,27}}, \quad (3.7)$$

где  $d$  – диаметр отверстия после развертывания (12–25 мм);

$v$  – скорость резания (5–10 м/мин);

$S$  – подача (0,6–1,6 мм/об).

Скорость резания для всех упомянутых видов обработки

$$v = \frac{\pi d n}{1000}, \quad (3.8)$$

где для токарной обработки:

$d$  – диаметр, обрабатываемой поверхности, мм;

- $n$  – скорость вращения шпинделя, об/мин;  
для фрезерной обработки торцевой фрезой:  
 $d$  – диаметр окружности, на которой расположены вершины зубьев фрезы, об/мин;  
 $n$  – скорость вращения фрезы, об/мин;  
для сверления и развертывания:  
 $d$  – диаметр обрабатываемого отверстия, мм;  
 $n$  – скорость вращения инструмента, об/мин.

### **Оборудование, инструменты и материалы**

1. Станки: токарный, фрезерный, сверлильный.
2. Профилометр «Сейтроник» ПШ8-1(СС).
3. Линейка 1–250 ГОСТ 427-7.5.
4. Образцы для исследования.

### **Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка состоит из профилометра и образцов для исследования.

Профилометр предназначен для измерения шероховатости поверхности деталей с твердостью не менее НВ10, сечение которых в плоскости измерения представляет собой прямую линию. Профилометр позволяет измерять  $R_a$  в пределах 0,04–12,5 мкм. Профилометр (рис. 3.2, 3.3) состоит из первичного преобразователя 1 (рис. 3.4), микропроцессорного блока 2 (рис. 3.5), источника питания постоянного тока 3, вспомогательных элементов 4 (стойки, подставки, сменные насадки) (рис. 3.6).

Действие прибора основано на принципе ошупывания неровностей контролируемой поверхности алмазной иглой щупа и преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в электрический сигнал, изменяющийся пропорционально этим колебаниям.

Микропроцессорный блок предназначен для усиления аналогового сигнала (напряжения), поступающего с первичного преобразователя, преобразования его в цифровую форму и дальнейшей обработки по специальной программе, управления электроприводом механизма перемещения щупа, вычисления параметров шероховатости контролируемой поверхности и выдачи результатов измерений на жидкокристаллический индикатор.

Подробное описание принципа работы, назначение основных элементов профилометра и порядок проведения измерений изложены в руководстве по эксплуатации прибора.



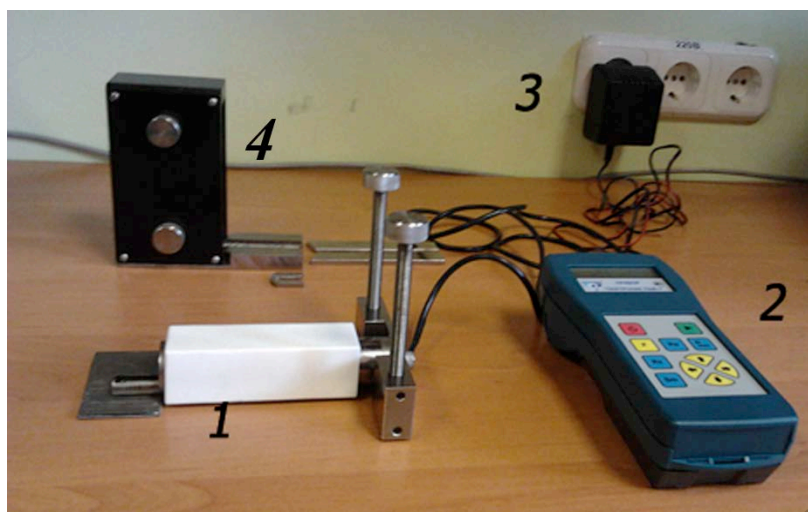


Рис. 3.2. Общий вид профилометра ПШ8-1(СС):  
 1 – преобразователь; 2 – микропроцессорный блок; 3 – источник питания;  
 4 – подставка (опоры П1, П6, П7, сменные насадки П2, П3, подставка П5)

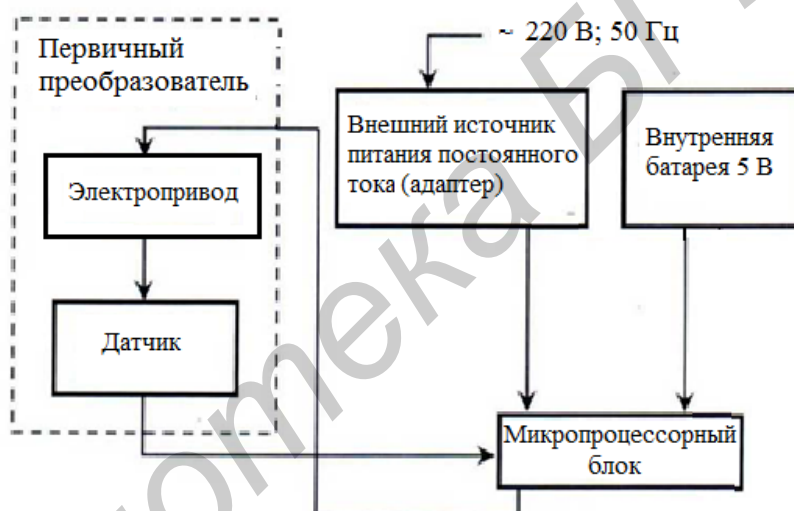


Рис. 3.3. Структурная схема профилометра

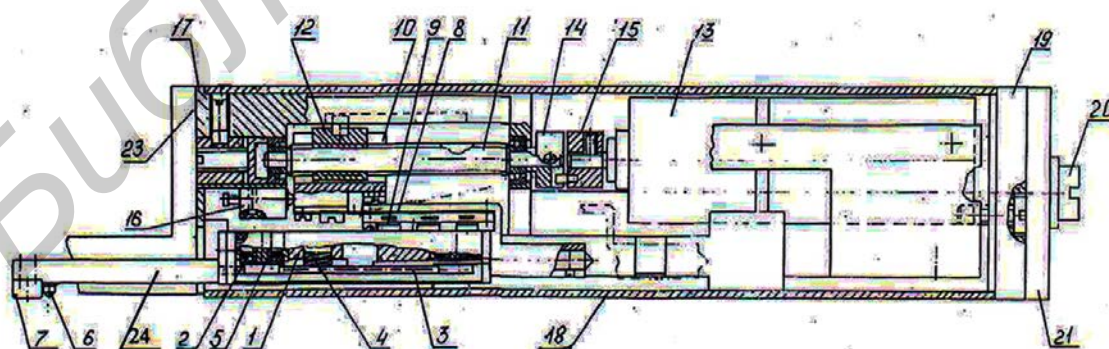


Рис. 3.4. Первичный преобразователь:  
 1 – корпус; 2 – катушки индуктивности; 3 – рычаг; 4 – пружина; 5 – якоря; 6 – алмазная игла;  
 7 – опора; 8 – пружина; 10 – ползун; 11 – ходовой винт; 12 – гайка; 13 – эл. двигатель постоянного тока; 14–15 – полумуфты; 16 – конечный выключатель; 17 – корпус; 18 – кожух;  
 19 – крышка; 20 – винт; 24 – щуп (индуктивный преобразователь)

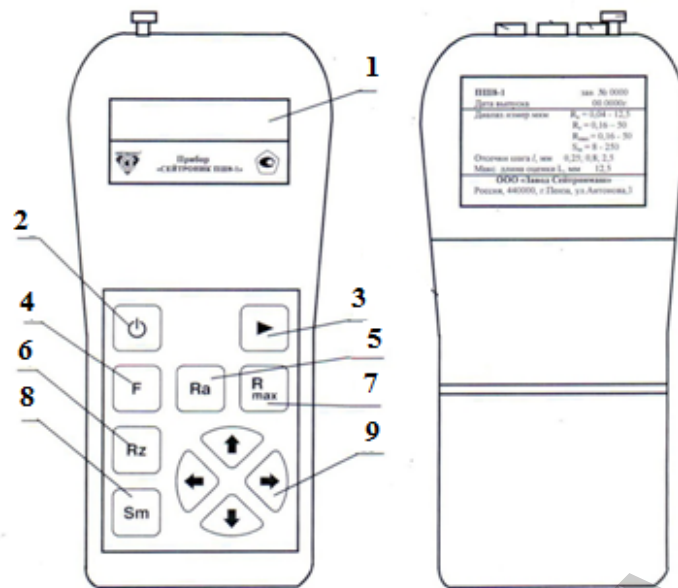


Рис. 3.5. Микропроцессорный блок:

1 – дисплей; 2 – клавиша «Питание»; 3 – клавиша «Измерение»; 4 – клавиша функций «F»; 5 – клавиша «Ra»; 6 – клавиша «Rz»; 7 – клавиша «Rmax»; 8 – клавиша «Sm»; 9 – клавиши кругового секторного поля

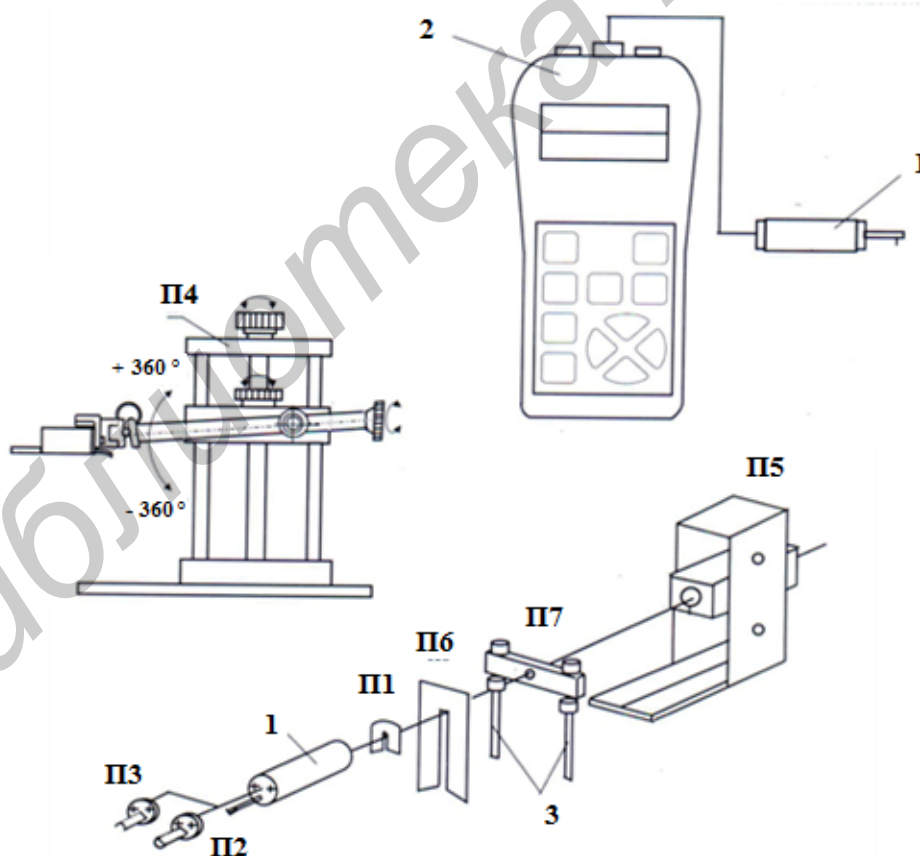


Рис. 3.6. Составная схема измерительной части профилметра ПШ8-1(СС):  
1 – первичный преобразователь; 2 – микропроцессорный блок; П1, П6, П7 – опоры;  
П2, П3 – сменные насадки; П4, П5 – подставки

## Порядок проведения измерения шероховатости на профилометре ПШ8-1(СС)

1. Включить прибор клавишей «Питание». На индикаторе микропроцессорного блока должно высвечиваться состояние балансировки измерительного механизма щупа в виде символов и соответствующих им числовых значений.

2. Произвести базирование первичного преобразователя на контролируемую поверхность с помощью дополнительных приспособлений (по выбору в зависимости от конфигурации и габаритных размеров контролируемой детали) таким образом, чтобы рабочая поверхность опоры и вершина иглы щупа первичного преобразователя находились в исходном положении (перед началом измерений) в одной плоскости (плоскости контролируемой поверхности), а нижняя образующая линия кожуха первичного преобразователя должна быть параллельна плоскости контролируемой поверхности так, чтобы во время всего рабочего хода (процесса измерения) вершина иглы не выходила за пределы контролируемой поверхности (состояние баланса измерительного механизма щупа).

3. Путем плавного перемещения заднего торца первичного преобразователя ниже или выше плоскости контролируемой поверхности добиться балансировки измерительного механизма щупа, т. е. высвечивания на индикаторе микропроцессорного блока симметричной формы символа баланса «X» и соответствующего ему числового значения от  $-10$  до  $+10$ .

4. После окончания балансировки приступить к измерениям шероховатости поверхности, для чего необходимо:

– нажатием клавиши функций «F» выбрать действие по установке необходимого числа отсечек шага (базовых длин)  $N$ . На индикаторе должно высвечиваться по умолчанию значение  $N = 3$ . Если указанное значение не подходит для измерения шероховатости конкретной поверхности, то нужно клавишей «↑» установить иное значение  $N$  из ряда 1; 3; 5 в зависимости от оценки длины контролируемого участка поверхности;

– нажатием клавиши функций «F» выбрать действие по установке значения отсечки шага (базовой длины)  $l$ . На индикаторе должно высвечиваться по умолчанию значение  $l = 0,8$ . Если указанное значение не подходит для измерения шероховатости конкретной поверхности, то нужно клавишей «↑» установить иное значение  $l$  из ряда 0,25; 0,8; 2,5 в зависимости от предполагаемой величины шероховатости контролируемой поверхности и поддиапазона измерений (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Поддиапазоны измерения $R_a$ и значения отсечки шага	
Поддиапазоны измерения $R_a$ , мкм	Отсечка шага, мм
От 0,04 до 0,4	0,25
Свыше 0,4 до 3,2	0,8
Свыше от 3,2 до 12,5	2,5

– путем нажатия клавиши функций «F» выбрать действие по установке режима работы с движением щупа. На индикаторе должно высвечиваться сообщение «С ДВИЖ».

5. Нажать клавишу «ИЗМЕРЕНИЕ». На индикаторе будет высвечиваться сообщение «Измерение». Электродвигатель включается и начинает вращать ходовой винт, по которому перемещается ходовая гайка, жестко связанная с ползуном. Ползун движется с постоянной линейной скоростью 1 мм/с или 0,5 мм/с (в зависимости от типа электродвигателя и коэффициента редукции) по направляющим в сторону электродвигателя, совершая рабочий (прямой) ход и перемещая измерительный механизм щупа. Алмазная игла измерительного механизма щупа при ощупывании неровностей контролируемой поверхности совершает колебательные движения относительно опоры. Эти колебания затем преобразуются в колебания электрического напряжения. Выходной сигнал подается в микропроцессор, где преобразуется в цифровую форму, затем вычисляются параметры шероховатости, которые выдаются в десятичном виде на жидкокристаллический индикатор по одному по мере нажатия клавиш «Ra», «Rz», «Rmax», «Sm».

6. Последовательным нажатием клавиш «Ra», «Rz», «Rmax», «Sm» вывести на жидкокристаллический индикатор рассчитанные значения параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ .

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со способами обработки металлов резанием, фрезерованием, сверлением и металлорежущими станками в межкафедральной мастерской (лаборатория №34).

2. Изучить инструкции по работе с профилометром модели ПШ8-1(СС).

3. Получить образцы, обработанные на металлорежущих станках, для проведения исследования шероховатости.

4. Подготовить к работе профилометр согласно руководству по эксплуатации профилометра.

5. Провести измерения параметров шероховатости образцов с помощью профилометра согласно методическим указаниям по выполнению лабораторной работы и руководству по эксплуатации профилометра.

6. Рассчитать теоретическое значение параметра  $R_a$  исследуемых образцов согласно методике, приведенной в описании к лабораторной работе.

7. Сравнить значения параметра  $R_a$ , определенные с помощью профилометра, с расчетными значениями. Провести анализ полученных результатов.

8. Оформить отчет.

### Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Краткие теоретические сведения.

3. Характеристики применяемого оборудования.

4. Экспериментальные данные и их обработка.
5. Расчетные данные и их обработка.
6. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Понятие шероховатости поверхности.
2. Реальная и номинальная поверхность.
3. Параметры, характеризующие шероховатость поверхности.
4. Связь допусков на линейные размеры элементов детали и шероховатости соответствующих поверхностей.
5. Выбор параметров для нормирования шероховатости поверхности.
6. Принцип назначения числовых значений параметров шероховатости поверхности.
7. Шероховатость поверхностей литых заготовок деталей.
8. Шероховатость поверхностей заготовок деталей, обрабатываемых давлением.
9. Шероховатость поверхностей при различных видах обработки деталей резанием.
10. Условное обозначение шероховатости поверхности на чертежах.
11. Методы контроля шероховатости поверхностей деталей.
12. Оборудование, применяемое для контроля шероховатости поверхностей.

### Литература

1. Машиностроение : энциклопедия. В 40 Т. Т. III-7 : Измерения, контроль, испытания диагностика / В. В. Клюев [и др.]; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2001. – 462 с.
2. Зайцев, С. А. Допуски, посадки и технические измерения в машиностроении / С. А. Зайцев. – М. : Издат. центр «Академия», 2006. – 304 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 Т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 2001. – Т. 1 – 912 с. ; Т. 2 – 944 с.
4. Дунин-Варковский, И. В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Варковский, Л. Е. Картошева. – М. : Машиностроение, 1978. – 264 с.
5. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебник / С. А. Зайцев [и др.]. – М. : Издат. центр «Академия», 2003. – 464 с.

## Лабораторная работа №4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Цель работы:** ознакомление с физической природой различных видов электроэрозионной обработки материалов. Изучение размерных (формообразующих) и неразмерных (упрочняюще-чистовых отделочных) операций электроэрозионной обработки. Исследование процесса электроискрового упрочнения конструкционных материалов с применением метода планирования эксперимента, получение регрессионного уравнения, связывающего твердость обработанной поверхности с параметрами электроискрового разряда.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электроэрозионная обработка является одним из методов электрофизикохимической и комбинированной обработки (ЭФХКО), основанной на непосредственном использовании тепловой энергии электрического тока. Она ведется импульсами электрического тока и имеет как размерные (формообразующие), так и неразмерные (упрочняюще-чистовые) операции. Формообразующие операции ведутся по схеме, представленной на рис. 4.1.

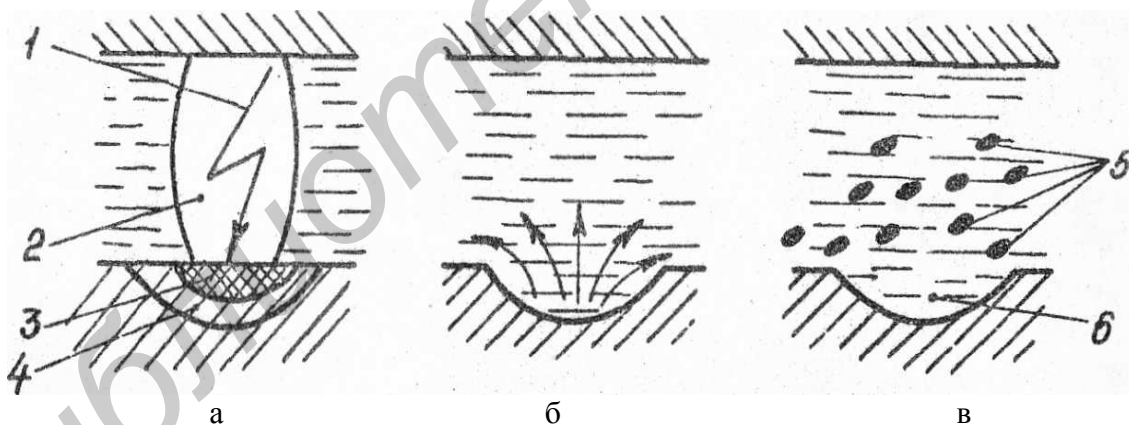


Рис. 4.1. Схема электроэрозионной обработки по стадиям:  
а – прохождение импульса; б – выброс материала; в – стационарный процесс.  
1 – газовая полость; 2 – канал проводимости; 3 – зона испарения; 4 – зона плавления; 5, 6 – гранулы застывшего металла

Известно, что плохие электрические контакты «искрят» при работе, контактные поверхности разрушаются. Было предложено использовать это явление для обработки металлов и сплавов. Новый вид обработки получил название электроискрового и последующие исследования были направлены на поиск путей усиления разрушающего действия электрической эрозии.

Для создания периодических разрядов к электродам (электроду-детали и электроду-инструменту) подводится электроэнергия такой мощности, что создается напряжение на электродах, равное напряжению пробоя межэлектродного промежутка. Чтобы процесс обработки не прерывался, межэлектродный промежуток должен быть постоянным. Для этого в электроэрозионных станках предусмотрено устройство, автоматически перемещающее электрод-инструмент к обрабатываемой детали по мере снятия материала электрода-детали.

Электрическая эрозия более интенсивно проявляется при заполнении межэлектродного пространства жидким диэлектриком (маслами, керосином и др.). Исследования показали, что в момент разряда в канале пробоя диэлектрика возникает температура порядка 40 000 К, а на поверхностях электродов – до 10 000 К. Канал разряда образуется между выступами на электродах, лежащих на кратчайшем расстоянии друг от друга. Следующий разряд возникает уже в другом месте, где точки на электродах оказываются ближайшими друг к другу.

При сильном разогревании поверхность электродов оплавляется и частично превращается в газ. Газ выплескивает из лунки жидкий металл, который попадает в диэлектрик, охлаждается и затвердевает в виде шариков. Образующиеся при этом газы, металлические частицы, продукты окисления делают процесс неустойчивым. Для его стабилизации в ванне создают поток жидкого диэлектрика, который выносит образующиеся продукты эрозии из разрядного промежутка.

Чем меньше межэлектродный промежуток, тем меньше пробивное напряжение. Оптимальный промежуток в масляном диэлектрике равен примерно 76 мкм. Производительность и точность обработки, шероховатость получаемой поверхности зависят от многих факторов, но важнейшими являются энергия и длительность разряда, форма инструмента, материал детали, инструмента и межэлектродного промежутка, взаимное расположение и размеры детали и инструмента.

Чем короче разряд и больше его мощность, тем больше энергии сконцентрировано в объеме разряда и тем выше температура и интенсивность съема металла. Длительный, большой мощности разряд имеет дуговой характер, производительность резко возрастает, но катод разрушается сильнее. Продолжительность интервалов между импульсами тока должна быть такой, чтобы обеспечивалось удаление из межэлектродного промежутка газовых пузырьков, продуктов эрозии и ионов, препятствующих последующему разряду.

При определенных режимах обработки можно добиться того, что эрозия одного из электродов будет значительно больше, чем другого. Это явление называют полярным эффектом. Если материал электродов одинаков, то при импульсах малой и средней продолжительности большая эрозия будет у анода, при импульсах большей длительности – у катода.

Процесс электрической эрозии не зависит от механических свойств материалов (прочности, твердости, вязкости), а определяется их теплофизическими характеристиками. В зависимости от времени расплавления данного объема ме-

талла определяются эрозионная стойкость и обрабатываемость различных материалов по критерию Палатника:

$$П = C_p \cdot \lambda \cdot \rho \cdot T_{пл}, \quad (4.1)$$

где  $C_p$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $T_{пл}$  – теплоемкость при постоянном давлении, коэффициент теплопроводности, плотность, температура плавления материала соответственно.

Разрушение материала электрода происходит при переводе его в жидкое состояние. Чем больше значение критерия  $П$ , тем при равных условиях обработки выше электроэрозионная стойкость и ниже обрабатываемость.

Вид электроэрозионной обработки определяется характеристиками разряда. Классификация методов электроэрозионной обработки приведена на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Виды электроэрозионной обработки

Особенности электроискровой обработки: длительность импульсов 10–200 мкс при частоте 2–5 кГц; прямая полярность (электрод-инструмент подключается к отрицательному полюсу источника тока); возможность создания режимов обработки от черновых (производительность 100–500 мм/мин при шероховатости поверхности  $R_z = 160-180$ ) до чистовых (производительность 0,01–0,1 мм/мин при шероховатости поверхности  $R_z = 6,3-1,6$ ); образование на поверхности детали тонкого дефектного слоя; большой износ электродов-инструментов (до 50–1000 % объема обработанного материала); возможность механизации и автоматизации процесса. Применяют электроискровую обработку для получения точных деталей с высоким качеством поверхности. Для обеспечения требуемых физико-механических свойств необходима последующая абразивная обработка поверхности. Электроискровую обработку используют



для изготовления и ремонта матриц штампов из закаленных сталей и твердых сплавов, получения отверстий диаметром до 0,1 мм и извлечения сломанного инструмента (метчиков, сверл и др.) из деталей.

В зависимости от технологических потребностей различают жесткие (грубые, обдирочные, черновые), средние (чистовые, сглаживающие) и мягкие (тонкие, отделочные) режимы обработки. Под режимами понимают сочетание энергии импульсов, их длительности и напряжения на электродах, при котором происходит пробой. Так как на практике осуществить контроль за этими величинами трудно, то пользуются другими электрическими параметрами: частотой следования импульсов, длительностью, напряжением и силой тока в импульсе (при использовании импульсных генераторов); емкостью конденсаторов, величиной зарядного тока, напряжением на электродах (при использовании релаксационных схем).

Недостатком электроискровой обработки является невысокая стойкость электрода-инструмента. Износ инструмента приводит к изменению размеров обрабатываемой поверхности. Поэтому одним инструментом обрабатывают 5–10 деталей. При сложной форме инструмента изготовление его длительно и дорого, а установка на электроэрозионном станке требует высоких навыков, т. к. незначительный перекос приводит к большому искажению формы обрабатываемой поверхности.

Инструмент должен быть электропроводным, эрозиостойким, легко и просто обрабатываться. Чаще всего для обработки сталей и твердых сплавов при электроискровой обработке для инструмента выбирают латунь, медь, алюминий; при электроимпульсной – графит, латунь и др. Для уменьшения износа инструмента применяют обработку непрофилированным инструментом, тонкой натянутой проволокой, непрерывно перематывающейся с одной катушки на другую. В обрабатываемой детали предварительно прошивают отверстие, чтобы в него ввести тонкую проволоку диаметром 0,1–0,3 мм. Деталь получает движение по копиру, заданной программе или используется ручное управление.

Электроимпульсная обработка аналогична электроискровой, но для нее характерны применение обратной полярности (электрод-инструмент соединен с положительным полюсом источника тока) и длительность импульсов 0,5–10 мс. Производительность при электроимпульсной обработке высокая (от 5000 до 15 000 мм/мин), точность низкая, шероховатость  $R_z = 40–80$ , достигаемая при самых мягких режимах. Износ инструмента, особенно графитового, незначителен (0,1–0,5 % от объема снятого материала). Станки работают при низком напряжении 25–30 В и большом токе 50–500 А. Источники электрического тока – машинные генераторы импульсов низкой и средней частоты (400–3000 Гц).

Этот метод применяют для снятия больших объемов материала и получения отверстий сложной формы в матрицах и других деталях из легированных сталей и сплавов. На черновых операциях он производительнее обработки резанием, но требует дополнительной чистовой обработки.

Высокочастотная электроэрозионная обработка – наиболее производительный и точный метод чистовой обработки, позволяющий получать по-

верхности с шероховатостью  $R_z = 0,8-1,6$  без последующей доводки. При съеме металла в пределах 15–20 мм/мин обеспечивается шероховатость  $R_z = 6,3-10$ , в пределах 3–10 мм/мин –  $R_z = 0,8-3,2$ . Колебания размеров обработанных поверхностей получают в пределах 1–3 мкм.

Высокочастотную электроэрозионную обработку производят на обычных электроэрозионных станках, оснащенных специальными приставками-генераторами и применяют для обработки твердосплавных пуансонов и матриц штампов, пресс-форм, литевых форм и других деталей.

Электроконтактная обработка отличается тем, что импульсы электрической энергии генерируются в результате взаимного перемещения электродов или за счет прерывания электрического разряда при прокачке жидкости под давлением. Ее проводят на постоянном и переменном токе, на воздухе или в жидкости, при значительных токах (до 500 А) и напряжении холостого хода источников питания 20–40 В.

Электроконтактным методом производят получистовое точение тел вращения, чистовую резку, прошивание цилиндрических и фасонных отверстий и объемных полостей, фрезерование, шлифование и др. Метод особенно эффективен при обработке заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов, монокристаллов, материалов с высокими теплофизическими свойствами. Электроконтактную обработку применяют, как правило, на заготовительных операциях и на операциях черновой обработки заготовок с большими припусками.

В табл. 4.1 приводятся основные технологические операции, проводимые с помощью электроэрозионной обработки.

Важным преимуществом электроэрозионной обработки является то, что при определенных условиях резко повышаются прочностные характеристики поверхности обрабатываемых деталей. Растет жаростойкость и эрозионная стойкость поверхностного слоя изделий. Эту особенность метода используют для повышения износостойкости режущего инструмента, штампов, пресс-форм, кокилей и других изделий.

При электроэрозионном упрочнении применяют обратную полярность (заготовка является катодом, инструмент – анодом). Обработку производят в воздушной среде и, как правило, с вибрацией электрода. Технологическое оборудование, с помощью которого осуществляется процесс упрочнения, малогабаритное и очень простое в эксплуатации.

Электроэрозионный способ нанесения покрытий имеет следующие достоинства: обеспечивается большая прочность сцепления покрытия с материалом основы, покрываемые поверхности не требуют предварительной подготовки, возможно нанесение не только металлов и сплавов, но и их композиций, на локальных участках обрабатываемой поверхности можно проводить сложные микрометаллургические процессы (табл. 4.2).

Таблица 4.1

Виды работ, выполняемых на электроэрозионных станках, и их эффективность по сравнению с обычной механической обработкой

Выполняемая работа	Эффективность
Обработка сложного профиля ручьев кованных штампов	Сокращение трудоемкости до 2-х раз; уменьшение слесарных работ на 30–40 %; экономия материала
Обработка формующих полостей сложных литевых форм	Сокращение трудоемкости на 20–30 %; повышение стойкости за счет применения более стойких материалов
Обработка матриц и пуансонов вытяжных штампов	Сокращение трудоемкости в 1,5–2 раза; уменьшение объема слесарных работ на 40–50 %
Многоинструментальная прошивка фасонных отверстий в матрицах вырубных штампов	Сокращение трудоемкости в 1–2 раза; повышение точности
Прошивка отверстий в матрицах стальных серийных штампов	Устранение ручных работ; повышение точности
Профилирование пуансонов по профилю матрицы штампов	Сокращение слесарных работ, в том числе по образованию зазоров
Обработка фасонных полостей высадочного инструмента	Снижение трудоемкости в 2–5 раз
Прошивка фасонных отверстий в матрицах для прессования	Сокращение трудоемкости в 2 раза
Обработка объемных деталей сложной формы из труднообрабатываемых материалов	Снижение трудоемкости в 2–5 раз; сокращение расходов на режущий инструмент и производственные площади
Прошивка отверстий сложного профиля в труднообрабатываемых материалах	Сокращение трудоемкости в 2–5 раз; снижение расхода режущего инструмента
Прошивка щелевидных отверстий в закаленных сталях и труднообрабатываемых материалах	Сокращение трудоемкости до 5 раз; получение конструктивных решений
Многоинструментальная прошивка решеток, сит и других деталей	Снижение трудоемкости в 3–10 раз; уменьшение износа инструмента
Изготовление сеток электровакуумных приборов	Возможность создания новых приборов
Изготовление тонких пластинчатых деталей (пружин, мембран)	Снижение трудоемкости; возможность создания новых приборов
Прошивка отверстий диаметром до 0,5 мм	Снижение трудоемкости; уменьшение износа инструмента
Гравирование и клеймение	Повышение качества и снижения трудоемкости
Обработка для создания особых свойств поверхностного слоя	Повышение износостойкости, качества и эксплуатационных свойств
Исправление и усовершенствование конструкций; извлечение сломанных инструментов	Устранение брака, возможность внесения исправлений в конструкцию деталей

Сущность электроэрозионного упрочнения состоит в том, что при электроискровом разряде в воздушной среде происходит полярный перенос материала электрода-инструмента на заготовку. Перенесенный материал электрода легирует металл заготовки и, химически соединяясь с диссоциированным атомарным азотом воздуха, углеродом и материалом заготовки, образует диффузионный, износоустойчивый упрочненный поверхностный слой. При этом в слое возникают сложные химические соединения, высокостойкие нитриды и карбонитриды, а также закалочные структуры. При обычных мощностях упрочнения толщина слоя покрытия может составлять 0,003–0,2 мм. При высокой мощности упрочнения можно получать глубину слоя до 0,5–1,5 мм с микротвердостью 50–60 МПа и выше. Различают чистовую обработку, которая соответствует высоким напряжениям и небольшим значениям токов короткого замыкания (до 20 А), и грубую (глубокое легирование) при низких напряжениях (50–60 В) и токах короткого замыкания свыше 20 А.

Таблица 4.2

Физико-химические процессы, протекающие в поверхностном слое заготовок при электроэрозионном упрочнении

Упрочняемый материал	Процесс	
	Наименование	Особенности
Высокоуглеродистая и высоколегированная сталь	Сверхскоростная закалка	Кратковременный нагрев до высокой температуры и мгновенное охлаждение нагретых и расплавленных участков массой холодного металла
Инструментальная сталь	Азотирование	Диссоциация атмосферного азота в разряде с образованием атомарного азота. Соединение азота с элементами поверхностного слоя и образование нитридов
Малоуглеродистая и слаболегированная сталь	Цементирование	Растворение в расплавленном и высоко нагретом металле углерода, элементов или окружающей среды с образованием карбидов железа, хрома, титана и др.
Сталь	Обогащение легирующими элементами	Контактный перенос материала электрода на заготовку при соприкосновении их под давлением, в расплавленном состоянии и газовая диффузия

Формирование импульсов тока, подводимых к электродам электроэрозионного станка, производится с помощью генераторов импульсов, которые можно разделить на два класса: зависимые и независимые. К первым относятся такие генераторы, в которых создание импульсов напряжения и тока осуществляется при участии межэлектродного промежутка. В независимых генераторах электрические импульсы формируются в самом генераторе и подводятся к межэлектродному промежутку. Зависимые генераторы используют при электроискровой обработке, независимые – при электроимпульсной.

На рис. 4.3 приведена схема  $RC$ -генератора. Такой генератор получил широкое распространение вследствие простоты и надежности. Накопительный конденсатор  $C$  заряжается от источника постоянного тока напряжением 100–200 В через токоограничительный резистор  $R$ . Межэлектродный промежуток включен параллельно конденсатору. По мере заряда конденсатора напряжение на его обкладках и между электродами эрозионного промежутка увеличивается. При достижении пробивного напряжения  $U_{пр}$  происходит пробой межэлектродного промежутка, и запасенная в накопительном конденсаторе энергия выделяется в виде короткого импульса большой мощности, вызывая эрозию электродов. При разряде конденсатора напряжение между электродом-деталью 1 и электродом-инструментом 2 уменьшается до значения, при котором разряд между электродами прекращается. Сопротивление межэлектродного промежутка резко увеличивается, ток быстро уменьшается до нуля. Межэлектродный промежуток восстанавливает свои диэлектрические свойства, начинается зарядка накопительного конденсатора. Далее процесс повторяется с частотой, зависящей от параметров схемы, расстояния между электродами и качества межэлектродного диэлектрика. Изменяя величину токоограничивающего резистора, можно изменять частоту следования импульсов и энергию, передаваемую в межэлектродный промежуток.

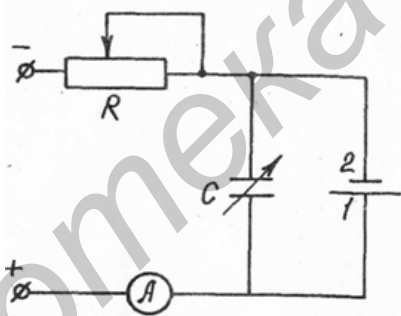


Рис. 4.3. Схема  $RC$ -генератора, применяемого при электроэрозионной обработке

Частоту импульсов можно определить по следующей формуле

$$f = (2,3 \cdot R \cdot C \cdot \lg \frac{U_0}{U_0 - U_{пр}})^{-1}, \quad (4.2)$$

где  $R$  – сопротивление резистора, Ом;

$C$  – емкость конденсатора, Ф;

$U_0$  – напряжение источника тока, В.

Энергию заряженного конденсатора, основная часть которой выделяется в межэлектродном промежутке, определяют по формуле

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{пр}^2. \quad (4.3)$$

При некотором критическом сопротивлении резистора паузы между отдельными импульсами исчезают и разряд из искрового переходит в дуговой. При этом между напряжениями источника питания, пробоя и горения дуги  $U_D$  должно соблюдаться соотношение  $U_o > U_{пр} > U_D$ . На практике принимают  $U_{пр} = 0,72U_o$ . К недостаткам  $RC$ -генератора следует отнести низкий КПД (около 35 %), наличие больших пауз между импульсами (скважность 10–100), влияние состояния межэлектродной среды на характеристики электрических импульсов.

### Обработка экспериментальных данных

При составлении программы экспериментальных исследований и для обработки опытных данных используется метод планирования эксперимента. Он дает возможность не только сократить объем опытных данных за счет проведения исследования по заранее намеченному плану, но и получить экспериментальную зависимость (регрессионное уравнение), описывающую поведение заданной величины как функции нескольких переменных (факторов). Такая зависимость позволяет описать весь экспериментальный материал и в пределах изменения исследованных параметров получать дополнительную информацию путем интерполяции. Важным является и то, что можно исследовать функцию многих переменных, раздельное влияние которых не удается выделить обычным путем. В общем случае уравнение регрессии записывают в виде

$$y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{ij} b_{ij} x_i x_j + \sum_{ijk} b_{ijk} x_i x_j x_k + \dots, \quad (4.4)$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijk}$  – постоянные числовые коэффициенты уравнения регрессии;  $x_i, x_j, x_k$  – независимые переменные (факторы).

Без учета членов второго порядка и для случая двух независимых переменных уравнение регрессии примет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2. \quad (4.5)$$

В исследованиях технологических процессов широкое распространение получил метод полного факторного эксперимента. Для построения уравнения регрессии в соответствии с этим методом составляется матрица планирования путем перебора значений независимых переменных при условии, что в каждом отдельном опыте их значения не будут повторяться.

Для упрощения расчетов коэффициентов уравнения регрессии переходят от натуральных значений переменных (факторов) к кодированным значениям. Интервалы варьирования факторов выбирают равными единице. Тогда основному уровню фактора будет соответствовать «0», а верхнему и нижнему уровням – «+1» и «-1» соответственно. Переход от натуральных значений факторов к безразмерным осуществляется по формуле

$$x_i = \frac{Q_i - Q_{i0}}{\lambda_i}, \quad (4.6)$$

где  $Q_i$  – натуральное значение независимой переменной (фактора);

$Q_{i0}$  – нулевой уровень фактора, который выбирается в середине размаха варьирования переменной;

$\lambda_i$  – шаг варьирования.

Для двухфакторного эксперимента с двумя независимыми переменными, варьируемыми на 2-х уровнях, матрица планирования дана в табл. 4.3. Такое планирование называют полным факторным экспериментом типа  $2^2$  (в общем случае  $2^b$ , где показатель степени указывает на число независимых переменных, а основание 2 – на число уровней, на которых варьируются переменные). В матрице планирования, кроме независимых переменных, добавлены еще столбцы «фиктивной» переменной для оценки свободного члена  $b_0$  и переменной  $x_1 x_2$  для определения нелинейного члена  $b_{12}$ .

Таблица 4.3

Матрица планирования двухфакторного эксперимента

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}_1$
1	+	-	-	+				
2	+	+	-	-				
3	+	-	+	-				
4	+	+	+	+				

По результатам параллельных измерений для каждого опыта определяют среднее значение выходного параметра:

$$\bar{y}_i = \sum_{i=1}^m y_i / m, \quad (4.7)$$

где  $m$  – число параллельных измерений.

В каждой точке плана рассчитывают дисперсию результатов опыта:

$$\sigma^2(\bar{y}_i) = \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i) / (m - 1), \quad (4.8)$$

где  $y_{ij}$  – значение выходного параметра в матрице планирования.

Числовые значения коэффициентов уравнения регрессии определяются по формулам:

$$b_0 = \sum_{i=1}^N \bar{y}_i / N, \quad (4.9)$$

$$b_i = \sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i / N, \quad (4.10)$$

$$b_{ij} = \sum_{i=1}^N x_i x_j \bar{y}_i / N, \quad (4.11)$$

где  $N$  – число опытов (для двухфакторного эксперимента  $N = 4$ );

Значимость коэффициента уравнения регрессии оценивается по критерию Стьюдента, для чего определяется ошибка эксперимента:

$$\sigma^2(y) = \frac{1}{m \cdot N} \sum_{i=1}^N \sigma^2(\bar{y}_i), \quad (4.12)$$

оценивается дисперсия коэффициентов уравнения регрессии:

$$\sigma^2(b_0) = \sigma^2(b_i) = \sigma^2(b_{ij}) = \frac{\sigma^2(y)}{N} \quad (4.13)$$

и вычисляются коэффициенты Стьюдента для каждого коэффициента уравнения регрессии:

$$t_i = |b_i| \sqrt{\sigma^2(b_i)}. \quad (4.14)$$

Коэффициент уравнения регрессии считается значимым, если вычисленное значение  $t_i$  превышает табличное критическое значение ( $t_i > t_{кр}$ ) для доверительной вероятности 0,95 и числа степеней свободы

$$f = N(m - 1) = 8. \quad (4.15)$$

В противном случае коэффициент считается незначимым, и соответствующий член уравнения регрессии исключается без пересчета остальных коэффициентов. Критическое значение критерия Стьюдента для двухфакторного эксперимента составляет  $t_{кр} = 2,306$  (для трехфакторного при  $f = 16$   $t_{кр} = 2,120$ ).

Адекватность полученного уравнения регрессии проверяется по критерию Фишера, величина которого равна

$$F_p = \sigma_{ост}^2 / \sigma^2(y). \quad (4.16)$$

Остаточная дисперсия определяется выражением

$$\sigma_{ост}^2 = \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i) / (N - \alpha), \quad (4.17)$$

где  $\hat{y}_i$  – значение выходного параметра, найденного из уравнения регрессии с учетом значимости коэффициентов;

$\alpha$  – число независимых параметров.

Уравнение регрессии признается адекватным, если расчетное значение критерия Фишера меньше критического значения ( $F_p < F_{кр}$ ).  $F_{кр}$  определяется по таблицам математической статистики в зависимости от выбранного уровня



значимости и числа степеней свободы. Для двухфакторного эксперимента  $F_{кр} = 224,6$  и соответствует уровню значимости  $K = 0,95$  и числу степеней свободы:  $f_1 = N - \alpha = 2$  и  $f_2 = m - 1$  (для трехфакторного эксперимента при  $f_1 = 5$  и  $f_2 = 2$ ,  $F_{кр} = 19,3$ ).

Если найденное уравнение регрессии оказалось неадекватным, то необходимо сузить интервалы варьирования независимых переменных, центр плана перенести в точку с наилучшими результатами выходного параметра или увеличить число параллельных измерений и все эксперименты повторить.

### **Приборы и оборудование**

1. Электроэрозионная установка «Элитрон-22».
2. Прибор для измерения твердости модели ГП-2.
3. Микроскоп инструментальный модели МИМ-7.

Установка «Элитрон-22» предназначена для электроискрового легирования поверхностей режущего инструмента штамповой оснастки и др. Потребляемая мощность не более 0,4 кВА. Частота вибрации легирующего электрода 100 Гц. Размах виброперемещений легирующего электрода регулируется в пределах 0,05–0,3 мм. Амплитудное значение напряжения на накопительных конденсаторах можно менять от 15 до 90 В, рабочий ток – от 0,5 до 2,8 А. Производительность установки до 5,0 см<sup>2</sup>/мин. Толщина наносимого слоя по наиболее выступающим частям от 0,01 до 0,12 мм. Высота микронеровностей профиля покрытия от 16 до 80 мкм.

В состав установки «Элитрон-22» входят генератор для создания импульсов тока, питания обмотки вибратора, контроля и управления техпроцессом и вибратор для коммутирования разрядной цепи вибрирующим электродом-инструментом.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы, приборами и оборудованием.
2. Пользуясь табл. 4.4, составить матрицу планирования эксперимента в соответствии с заданием.
3. Представить матрицу планирования преподавателю и после ее проверки получить у инженера необходимое количество образцов.
4. Измерить твердость образцов в трех точках по всей обрабатываемой поверхности и усреднить результат.
5. Включить электроэрозионную установку. Провести обработку образцов согласно матрице планирования. После каждого опыта замерить твердость обработанной поверхности в трех точках.
6. Проконтролировать поверхность образцов на инструментальном микроскопе и зарисовать характерный рельеф поверхности.

7. Получить регрессионное уравнение электроискровой обработки в соответствии с изложенной выше методикой, используя для этого программу для ПЭВМ «PFE».

8. Рассчитать и построить на основе регрессионного уравнения зависимости твердости слоев от силы тока и количества нанесенных слоев.

9. Оформить отчет по лабораторной работе.

Таблица 4.4

Варианты математического планирования экспериментов при исследовании электроискрового упрочнения

Вариант	Технологический фактор	Нулевой уровень $Q_0$	Шаг варьирования $\lambda$	Уровень факторов	
				$Q_0 - \lambda$	$Q_0 + \lambda$
1	I, A n	1	0,2	0,8	1,2
		2	1	1	3
2	I, A n	1	0,2	0,8	1,2
		3	1	2	4
3	I, A n	1	0,2	0,8	1,2
		4	1	3	5

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие сведения из теории.
3. Матрица планирования эксперимента с экспериментальными данными.
4. Уравнение регрессии с учетом проверки значимости коэффициентов.
5. Графические зависимости.
6. Выводы.

### Литература

1. Технология конструкционных материалов : учебник для вузов / А. М. Дальский [и др.]; под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 2005. – 512 с.
2. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Т. III-3 : Технология изготовления деталей машин / А. Г. Суслов [и др.] ; под ред. А. Г. Сулова. – М. : Машиностроение, 2000. – 840 с.
3. Наумов, А. А. Эффективное управление экспериментом / А. А. Наумов, В. В. Сенич. – Новосибирск : ОФСЕТ, 2003. – 254 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / А. М. Дальский [и др.]; под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 2006. – Т. 1 – 912 с. ; Т. 2 – 944 с.

## Лабораторная работа №5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ

**Цель работы:** изучение особенностей процесса пластического деформирования труднообрабатываемых металлов в ультразвуковом поле. Ознакомление с устройством и принципом действия установки для горячего ультразвукового плющения проволоки в вакууме. Получение образцов ленты из проволоки. Исследование физико-механических свойств полученных лент и сравнение их с аналогичными свойствами исходной проволоки.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### Применение металлических лент в электронной аппаратуре

Основными областями применения узких металлических лент являются радиоаппарато- и приборостроение, электровакуумная техника. В радиоаппаратостроении металлические ленты применяются для изготовления токоведущих элементов, электродов, катушек индуктивности; в производстве ЭВМ – для изготовления подвижных носителей информации. В приборостроении металлические ленты применяются для изготовления основных элементов приборов времени (часовые механизмы), ускорения (акселерометры), упругих элементов электроизмерительных приборов (высокочастотные осциллографы, петлевые гальванометры), моментных пружин, растяжек и подвесов индикаторных головок, прокладок универсальных магнитных головок. В электровакуумной технике металлические ленты применяются для изготовления катодов, сеток, конструкционных и токоведущих элементов приемно-усилительных ламп, замедляющих систем ламп бегущей волны и ламп отражающей волны. Характерной особенностью применения таких лент в приборостроении и электровакуумной технике является то, что применяются в основном ленты и микроленты, изготавливаемые из высокопрочных и тугоплавких металлов, к которым относятся бронза, специальные стали и сплавы, молибден, вольфрам, рений и сплавы на их основе. Это обусловлено высокими требованиями, предъявляемыми к физико-механическим и эксплуатационным свойствам лент.

#### Особенности обработки давлением труднообрабатываемых металлов

Рассмотрим основные физико-механические свойства труднообрабатываемых металлов на примере тугоплавких металлов: вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, титана, циркония и рения (табл. 5.1). Эти металлы отличаются высокой температурой плавления ( $> 1700$  °С), низкой скоростью испарения, прочной, преимущественно объемно-центрированной кубической кристалличе-

ской структурой, высокой химической стойкостью в области нормальных температур. Механическая прочность тугоплавких металлов обеспечивает им высокую формоустойчивость при значительных тепловых нагрузках, что особенно важно при изготовлении и эксплуатации электронных ламп и других высокотемпературных элементов РЭС. Тугоплавкие металлы отличаются высоким значением удельного электросопротивления. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) указывает на возможность получения прочных сплавов многих из них со стеклом и керамикой. Тугоплавкие металлы антикоррозионные, они не окисляются при комнатной температуре на воздухе.

Таблица 5.1

Основные физико-механические свойства тугоплавких металлов

Свойство	Наименование тугоплавких металлов						
	вольфрам	молибден	тантал	ниобий	титан	цирконий	рений
Плотность, $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	19,3	10,2	16,6	8,5	4,5	6,5	21
Температура плавления, °С	3410	2625	2996	2415	1725	1845	3176
ТКЛР (0–100 °С), $\times 10^{-7}$ , град <sup>-1</sup>	44	53	66	72	81	54	68
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом·м	$5,5 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-5}$	$16,5 \times 10^{-5}$	$13 \times 10^{-5}$	$42 \times 10^{-4}$	$41 \times 10^{-4}$	$19,8 \times 10^{-4}$
Предел прочности при растяжении, МПа	1100	800–1200	350–700	350–700	270–340	250–430	500
Относительное удлинение, %	0	20–25	40	30	50	12–31	25

Основным способом изготовления лент из тугоплавких металлов является обработка давлением проволок, т. е. плющение. Обработка давлением основана на использовании пластичности металла, его способности изменять форму без разрушения под действием приложенных сил давления. Такая обработка применима лишь к пластичным металлам и неприменима к малопластичным – хрупким. Поэтому тугоплавкие металлы, которые при низких температурах склонны к хрупкому разрушению, необходимо перед обработкой давлением подвергать нагреву до рекристаллизационных температур.

Изменение внутренней структуры металла при нагреве, связанное с образованием и ростом кристаллов с неискаженной решеткой вместо деформированных, называется рекристаллизацией. Она сопровождается снижением прочности и твердости и увеличением пластичности металла. Процесс рекристаллизации зависит от температуры и степени деформации. Температура, при которой происходит восстановление пластически деформированных кристаллитов, называется температурой рекристаллизации. Для химически чи-

стых металлов по А. А. Бочвару температура рекристаллизации  $T_p = 0,3-0,4 \cdot T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  – температура плавления по абсолютной шкале. Если обработка давлением ведется при температурах, обеспечивающих рекристаллизацию, то она называется горячей обработкой давлением. Вольфрам и его сплавы подвергаются горячей обработке давлением при температурах 1200–2000 °С.

Характерной особенностью тугоплавких металлов является высокая склонность к окислению и газонасыщению при нагреве на воздухе (выше 300–400 °С). Поэтому при горячей обработке давлением заготовки и полуфабрикаты из таких металлов и сплавов окисляются на большую глубину, что приводит к охрупчиванию поверхностных слоев, понижению общей пластичности, ухудшению качества поверхности и снижению выхода годной продукции. В связи с этим нагрев и обработку давлением тугоплавких металлов и сплавов производят в защитной среде или в вакууме. Наиболее прогрессивным методом защиты тугоплавких металлов от окисления и газонасыщения является вакуумирование технологической линии: зоны нагрева, деформации и охлаждения. Деформирование в вакууме позволяет почти полностью исключить окисление и газонасыщение металлов при одновременном увеличении их пластичности.

### **Интенсификация технологических процессов обработки давлением**

Прогрессивным направлением в обработке материалов является использование мощных направленных потоков энергии: ультразвуковой, электрической, световой и т. д. Ультразвук позволяет ускорять многие технологические процессы, улучшать качество изделий, быть в ряде случаев единственным средством проведения технологических операций.

Преимущество метода пластической деформации с применением ультразвуковых колебаний состоит в значительном снижении усилий и затрат энергии на деформацию, повышении производительности оборудования, улучшении качества изделий. Это преимущество особенно проявляется при деформации труднообрабатываемых металлов. Применение ультразвука позволяет снизить температуру нагрева тугоплавких металлов, а для некоторых металлов, таких, как молибден, никель, осуществить качественную деформацию в холодном состоянии.

С ультразвуковым облучением твердых тел связаны два нелинейных эффекта: «акустическое разупрочнение» и «акустическое упрочнение». Первое происходит в процессе облучения интенсивным ультразвуком и заключается в уменьшении статического напряжения, необходимого для осуществления пластической деформации. Такая закономерность объясняется тем, что акустическая энергия поглощается в тех местах кристаллической решетки, которые являются носителями пластической деформации (дислокации, границы зерен) и почти не поглощается в свободных от дефектов зонах. При определенном для каждого металла уровне дополнительных циклических напряжений, воздействующих на дислокации, создаются условия для их перемещения и размножения. Это означает, что при ультразвуковом облучении металла в момент де-

формирования его формоизменение начнется при меньших статических нагрузках на обрабатывающий инструмент, в сравнении с обычными методами обработки давлением (штамповка, прокатка, волочение и др.).

«Акустическое упрочнение» заключается в повышении прочностных свойств металла и наблюдается при деформировании металлов, подвергнутых длительному облучению ультразвуком. Этот эффект объясняется значительным повышением плотности дислокаций при облучении, образованием клубков и сплетений дислокаций, заторможенных на границах зерен и других дефектах. В данном случае повторное пластическое деформирование (интенсивное движение дислокаций) начнется при большем уровне внешних напряжений. Ультразвуковое упрочнение применяется для улучшения эксплуатационных свойств металлов.

Эффективность применения ультразвука в процессах горячей деформации обусловлена также и тем, что ультразвук (за счет прерывности контакта) значительно снижает силы трения между обрабатываемым металлом и инструментами, исключает процессы их схватывания и сваривания и таким образом позволяет улучшить качество и увеличить производительность обработки.

### Описание лабораторной установки

Схема установки, позволяющей реализовать процесс ультразвукового плющения проволоки из тугоплавких металлов, изображена на рис. 5.1. Компонировка двух акустических систем, обеспечивающих процесс микроакустической деформации, приведена на рис. 5.2, 5.3.

Из рис. 5.3 видно, что исходная проволока 1 при плющении протягивается между двумя инструментами 2 и 3, колеблющимися с ультразвуковой частотой, к которым приложено статическое усилие  $P$ . Инструменты колеблются синфазно, т. е. в первый полупериод колебаний они движутся вверх и вниз, образуя зазор  $(4A + h)$  (см. рис. 5.2), в который подается проволока. Во второй полупериод они обжимают проволоку, деформируя микрообъем металла, находящийся в данный момент в очаге деформации (заштрихованная на рис. 5.2 зона металла). Такой процесс микроковки протекает непрерывно и металл, проходя очаг деформации, деформируется по высоте с размера  $D$  в размер  $h$ . При этом будет наблюдаться некоторая вытяжка и уширение металла с образованием ленточного профиля с толщиной  $h$  и шириной  $S$ .

Источниками ультразвуковых колебаний в акустической системе являются магнитострикторы 4 (см. рис. 5.3), резонансная частота которых равна 22 кГц. Они запитываются от ультразвукового генератора мощностью 400 Вт. Процесс нагрева проволоки и плющения осуществляется в вакуумной камере 5 (см. рис. 5.1), которая откачивается до давления  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. с помощью паромасляного агрегата ВА-05-4 и механического вакуумного насоса НВР-50 через патрубок 6. Проволока нагревается нагревателем 7, содержащим водоохлаждаемые лампы инфракрасного излучения. Для перемотки проволоки-ленты в процессе плющения служат приводные бобины 8 и 9. Привод бобин

осуществляется от двигателей постоянного тока. Зазор между бойком и накопальной устанавливается с помощью клинового механизма 10. Тензометрические ролики 11 применяются для измерения натяжения ленты, ролики 12 – направляющие.

Управление работой установки осуществляется централизованно с пульта управления.

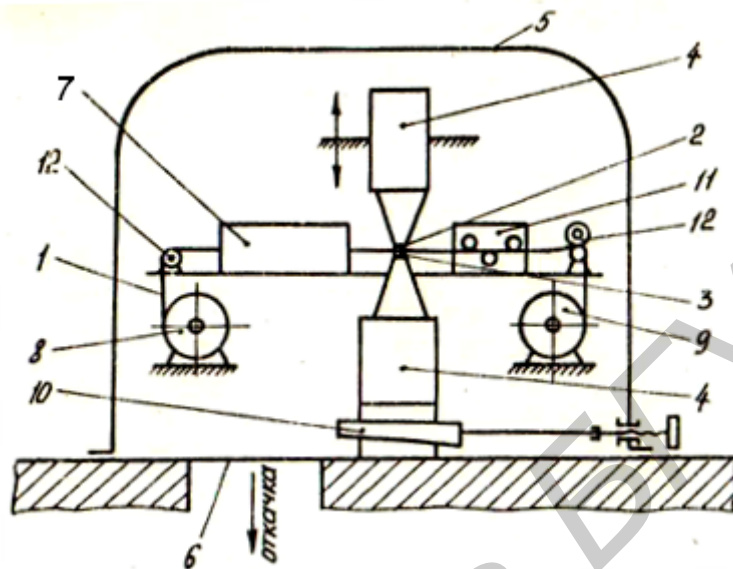


Рис. 5.1. Схема установки для ультразвуковой обработки давлением в вакууме

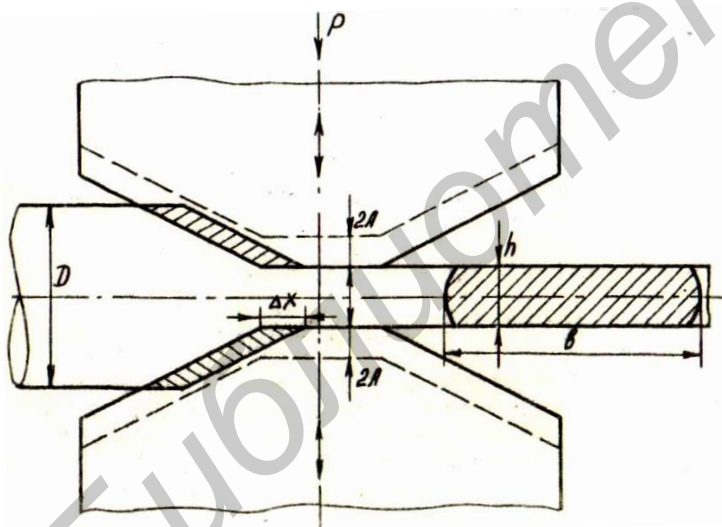


Рис. 5.2. Схема очага деформации проволоки

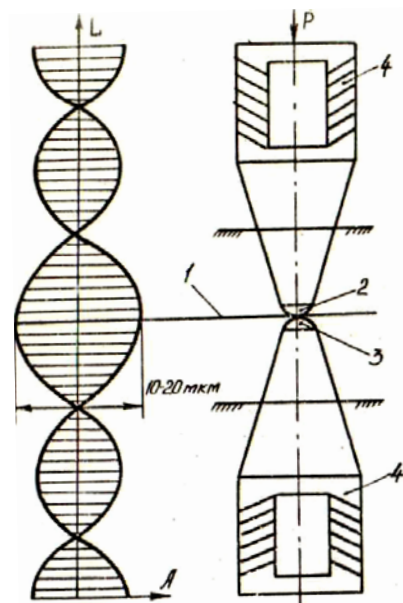


Рис. 5.3. Акустическая система установки

В лабораторном макете установки осуществляется моделирование процесса ультразвукового плющения на медной проволоке, которая позволяет проводить ее пластическую деформацию без предварительного подогрева. Это дает возможность осуществлять ее обработку на воздухе. Поэтому вакуумная камера, системы откачки и нагрева в лабораторном макете отсутствуют.

## Применяемое оборудование, инструменты и материалы

1. Лабораторная установка ультразвукового плющения.
2. Микроскоп МИИ-4.
3. Разрывная машина типа НТЦ-13.04.4.
4. Приспособление для испытания на перегиб.
5. Микрометр.
6. Проволока медная диаметром 0,22–0,5 мм.

## Методика выполнения работы

1. Включить и вывести на технологический режим плющения лабораторную установку согласно инструкции по обслуживанию установки. Технологические параметры плющения проволоки из меди следующие:

- амплитуда колебаний ультразвуковых инструментов – 10 мкм;
- скорость плющения – 0,05–0,2 м/с.

2. Получить на установке при заданном технологическом режиме ленту длиной 0,2–0,5 м.

3. Определить степень обжатия проволоки по формуле

$$A = \frac{D-h}{D}, \quad (5.1)$$

где  $D$  – диаметр исходной проволоки;

$h$  – толщина полученной ленты.

Степень обжатия проволоки характеризует величину деформации проволоки в процессе плющения.

4. Определить точность плющения ленты по толщине при измерении толщины ленты в десяти точках. Для этого необходимо рассчитать следующие точностные параметры:

а) среднее значение толщины ленты:

$$h_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5.2)$$

где  $x_i$  – значение параметра в  $i$ -й точке;

$n$  – число измерений.

б) среднее квадратическое отклонение толщины ленты:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - h_{\text{ср}})^2}; \quad (5.3)$$

в) ширину доверительного интервала, характеризующую точность полученной ленты:



$$\Delta h = \frac{s}{\sqrt{n}} t, \quad (5.4)$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента, который для доверительной вероятности 0,95 и числа измерений 10 равен 2,26.

Толщина ленты представляется в виде

$$h_{\text{НОМ}} = h_{\text{ср}} \pm \Delta h. \quad (5.5)$$

5. Провести исследование шероховатости поверхности полученной ленты с помощью микроинтерферометра МИИ-4 согласно инструкции по эксплуатации. Обратит внимание на наличие внешних дефектов (вид, количество) на поверхности ленты.

6. Провести исследование механических характеристик ленты. Для этого с помощью разрывной машины получить диаграмму растяжения полученной ленты (рис. 5.4).

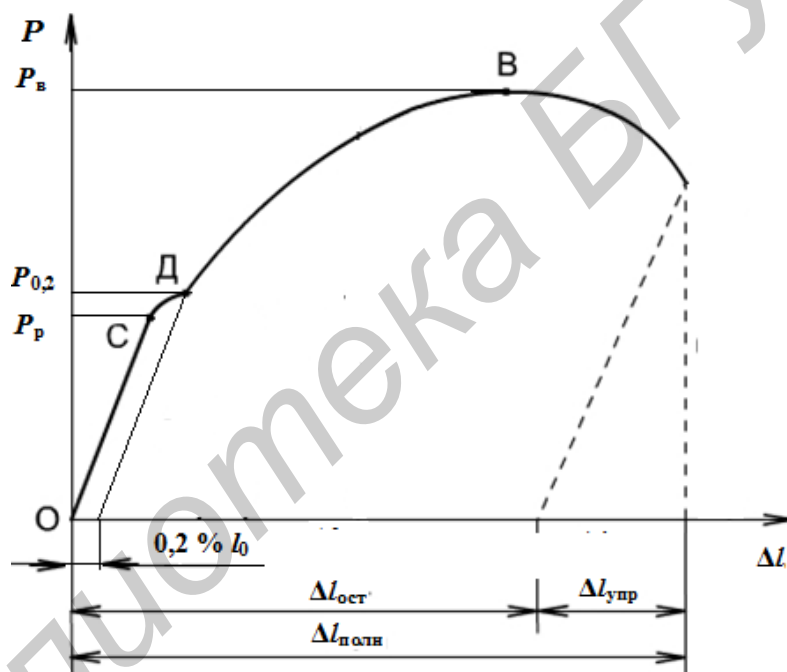


Рис. 5.4. Диаграмма растяжения ленты

По диаграмме растяжения определить:

а) предел пропорциональности

$$\sigma_p = P_p / F_0, \quad (5.6)$$

где  $P_p$  – усилие, соответствующее пределу пропорциональности, Н;  
 $F_0$  – площадь поперечного сечения ленты,  $\text{м}^2$ .

б) условный предел текучести

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0, \quad (5.7)$$

где  $P_{0,2}$  – усилие, соответствующее условному пределу текучести, Н;

в) предел прочности на растяжение

$$\sigma_B = P_B / F_0, \quad (5.8)$$

где  $P_B$  – усилие, соответствующее пределу прочности на растяжение, Н.

Условный предел текучести – это растягивающая нагрузка, при которой остаточное удлинение образца  $\Delta l_{\text{ост}}$  составляет 0,2 % его первоначальной длины  $l_0$ . Относительное удлинение образца определяется по формуле

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = \Delta l_{\text{ост}} / l_0, \quad (5.9)$$

где  $l$  – конечная длина образца.

Площадь поперечного сечения ленты определяется по формуле

$$F_0 = b \cdot h - 0,18 h^2, \quad (5.10)$$

где  $b$  – фактическая ширина ленты.

7. Провести испытание полученной ленты на перегиб на специальном приспособлении. Для проведения испытаний образец устанавливают вертикально и зажимают в губках приспособления. Затем образец загибают на 90° попеременно то в правую, то в левую сторону. Загиб производится со скоростью не более 60 перегибов в минуту. Загиб на 90° вправо, а затем на 90° влево считается за один перегиб. Подсчитывается количество перегибов до разрушения ленты.

Испытание на перегиб позволяет определить способность материала выдерживать многократные изгибные нагрузки.

8. Занести результаты экспериментальных исследований и расчетов в итоговую таблицу (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Итоговая таблица экспериментальных исследований и расчетов

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение параметра
1. Диаметр исходной проволоки	$D$	м	
2. Степень обжата	$A$	%	
3. Средняя толщина	$h_{\text{ср}}$	м	
4. Среднее квадратическое отклонение толщины	$s$	м	
5. Точность ленты	$\Delta x$	м	
6. Предел пропорциональности	$\sigma_p$	МПа	
7. Условный предел текучести	$\sigma_{0,2}$	МПа	
8. Предел прочности	$\sigma_B$	МПа	
9. Относительное удлинение	$\varepsilon$	%	
10. Наличие внешних дефектов (вид, количество)	–	–	
11. Число перегибов до разрушения	$n$	–	

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения о тугоплавких металлах и особенностях их обработки.
3. Схема и краткое описание лабораторной установки. Схема акустической системы.
4. Описание методики исследования полученных лент и необходимые расчеты.
5. Итоговая таблица исследований.
6. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Области применения лент из труднообрабатываемых металлов.
2. Характерные свойства тугоплавких металлов.
3. Особенности обработки тугоплавких металлов.
4. Обоснуйте эффективность применения ультразвука и вакуума в технологии обработки тугоплавких металлов.
5. Основные механические свойства проволок и лент.
6. Влияние горячей обработки в вакууме с ультразвуком на механические свойства тугоплавких металлов.

## Литература

1. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. / С. П. Кундас [и др.] – Минск : Бестпринт, 2002. – Т. 1 – 404 с.
2. Технология конструкционных материалов : учебник для вузов / А. М. Дальский [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 2005. – 512 с.
3. Пейсахов, А. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник / А. М. Пейсахов. – СПб. : Изд. Михайлова В. А., 2009. – 407 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Штампы механического действия для холодной листовой штамповки

Таблица П.1.1

Наименование оборудования	Модель	Техническая характеристика		
		номинальное усилие, кН	ход ползуна, мм	частота хода, мин <sup>-1</sup>
Пресс кривошипный простого действия	КД2114А	25	36	250, 200, 400
	КД2118А	63	50	190, 150, 250
	КД2120	100	50	170
	КД2122Е	160	55	160
	КД2124Е	250	65	160
	КД1424	250	65	120
	КД2126Г	400	90	140
	КД2128Е	630	100	125
	КВ235	630	100	90
	КЕ2130	1000	130	100
	К2130А	1000	–	–
К2128Ф3	630	71	63	
Пресс кривошипный с ЧПУ, автомат	А6826А	400	50	10–90
Пресс однокривошипный двойного действия	К04.161.530	1000	420	16
	КБ5535	3150	630	16
Пресс двухкривошипный двойного действия	КА6030	1000	700	10
	КА6032	1600	800	16
Пресс-автомат для чистовой вырубki пробивки	А6830А	1000	60	16–75
	А6428Д	630	16	130, 190, 250
	А6430	1000	20	75, 150, 400
	А6433	2000	20	75, 150, 400
Листоштамповочный комплекс	К0130Ф4	1000	–	100
Листоштамповочный комплекс	К3034	2500	–	16
Листоштамповочный комплекс	АКК63ПР	630	100	90

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

**Шероховатость поверхности и качества точности отливок**

Таблица П.2.1

Вид литья	Материалы	Размеры заготовок (мм)	$R_a$ , мкм не более		Квалитеты точности		
			возможные	оптимальные	высокая	нормальная	низкая
В песчаные формы; в землю	Черные металлы	–	25–160	100	16, 17		
	Цветные сплавы	1–1000 1000–2500	12,5–50		12–14 14, 15	15 15, 16	16 16, 17
В кокиль	Черные металлы	–	6,3–25	25	14–16		
	Цветные сплавы	1–180 180–1000	3,2–12,5		11–12 12–14	14 14, 15	14, 15 15, 16
По выплавляемым моделям	Черные металлы	–	1,6–12,5	6,3	11–13		
	Цветные сплавы	1–30 30–260 260–500	1,6–12,5		10, 11 11, 13 12, 14	12, 13 12, 14 14, 15	14 14, 15 15
В оболочковые формы	Черные металлы	–	6,3–25	12,5	11–14		
	Цветные сплавы	1–260 260–1000	1,6–12,5		11–13 12–14	14 14, 15	15 15, 16
Под давлением	Цинковые, магниевые и алюмин. сплавы	–	0,8–6,3	6,3	9–11	12	14,5
	Медные сплавы	–	0,8–6,3	12,5	11–13	12–14	15
Центробежное	–	–	3,2–25		11–13	14	15

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Шероховатость поверхностей и качества точности деталей, обрабатываемых давлением

Таблица П.3.1

Вид обработки		Значения $R_a$ , мкм	Квалитеты	
			экономичные	достижимые
Горячая объемная штамповка без калибровки		12,5–50	9–11	–
Холодная штамповка в вытяжных штампах	Вытяжка полых деталей простых форм (корпуса, стаканы)	0,8–3,2	по диаметру	
			10, 11	8, 9
	по высоте			
	Глубокая вытяжка		11	–
Холодная штамповка в вырубных, пробивных и зачистных штампах	Контурные размеры при вырубке плоских деталей	Зона среза 3,2–6,3	12, 13	11
	То же при пробивке	Зона скалывания 25–100	11	8, 9
	То же, но при зачистке	0,8–3,2	8, 9	–
	То же, но при зачистке и калибровке	0,8–3,2	6, 7	–
Круглый холодный прокат (калиброванный)	Сталь	0,8–3,2	–	–
	Латунь	0,4–2,6	–	–
Прокат труб	Алюминиевые сплавы	0,8–2,6	–	–
Прокат листовой	Сталь	0,8–3,2	–	–
	Латунь	0,4–1,6	–	–
Прокат ленты	Сталь	0,8–1,6	–	–
	Латунь, бронза	0,2–0,8	–	–
Прокат после обдувки песком	Сталь	3,2–6,3	–	–
	Алюминиевые сплавы	3,2–6,3	–	–

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

**Шероховатость поверхности и качества точности при обработке деталей  
резанием**

Таблица П.4.1

Вид обработки		Значения параметра $R_a$ , мкм	Квалитеты точности	
			экономичные	достижимые
1		2	3	4
Отрезка	пилой	(12,5)25–50	15–17	–
	резцом	10–25	14–17	–
	фрезой	25–50	14–17	–
	абразивом	3,2–6,3	12–15	–
Фрезерование торцо- вой фрезой	черновое	6,3–12,5	(11)12–14	–
	чистовое	(1,6)3,2–6,3	11	10
	тонкое	(0,8)–1,6	8, 9	6, 7
Фрезерование ци- линдрической фрезой	черновое	25–50	(11)12–14	–
	чистовое	3,3–6,3	(10)11	–
	тонкое	1,6	8, 9	6, 7
Фрезерование ско- ростное	черновое	3,2	12–14	11
	чистовое	0,8–1,6	11–13	8, 9
Сверление	до 15 мм	6,3–12,5	12–14	10, 11
	свыше 15 мм	12,5–25	12–14	10, 11
Рассверливание	–	(6,3)12,5–25	12–14	10, 11
Зенкерование	черновое	12,5–25	12–15	–
	чистовое	3,2–6,3	10, 11	8, 9
Растачивание	черновое	50–100	15–17	–
	получистовое	12,5–25	12–14	–
	чистовое	(0,8)1,0–3,2	8, 9	7
	тонкое (алмазное)	(0,2)0,4–0,8	7	6
Развертывание	получистовое	6,3–12,5	9, 10	8
	чистовое	1,6–3,2	7, 8	–
	тонкое	(0,4)–0,8	7	6
Протягивание	получистовое	0,3	8, 9	–
	чистовое	0,8–3,2	7, 8	–
	отделочное	0,2–0,4	7	6
Зенкерование	угловое	3,2–6,3	–	–
	плоское	6,3–12,5	–	–
	с направлением			
Слесарная опиловка		(1,6)–25	8–11	6, 7
Шлифование круглое	получистовое	3,2–6,3	8–11	–
	чистовое	0,8–1,6	6–8	–
	тонкое	(0,1)0,2–0,4	5	выше 5-го
Шлифование плоское	получистовое	3,2	8–11	–
	чистовое	0,8–1,6	6–8	–
	тонкое	(0,1)0,2–0,4	6, 7	6
Прошивание	чистовое	0,4–1,6	7–9	–
	тонкое	0,05–1,6	6, 7	–

Окончание табл. П.4.1

1		2	3	4
Притирка	чистовая	0,4–3,2	6, 7	–
	тонкая	0,1–1,6	5	–
Калибрование отверстий шариком или оправкой	после сверления растачивания развертывания	0,4–1,6	8, 9	7, 6
		0,4–1,6	7	
		0,05–1,6	7	
Полирование	обычное	0,2–1,6	6	–
	тонкое	0,05–0,1	5	–
Доводка	грубая	0,4	6, 7	5
	средняя	0,1–0,2	5, 6	5
	тонкая	0,05	5	выше 5-го
	отделочная	0,012–0,025	–	–
Хонингование	плоскостей цилиндров	0,1–0,4	7, 8	6
		0,05–0,1	6, 7	–
Суперфиниширование	плоскостей цилиндров	(0,05) 0,2–0,4	5 и точнее	–
		(0,05)0,1–0,4	6 и точнее	–
Обработка зубьев зубчатых колес	строгание	(1,6)3,2–6,3	7–10	–
	фрезерование	(1,6)–3,2	7–10	–
	шлифование	0,4–0,6	5, 6	–
	шевингование	(0,4)0,8–1,6	5, 6	–
Анодно-механическое шлифование	черновое	1,6–3,2	6–9	–
	чистовое	0,2–0,8	6, 7	–
	притирочное	0,4–0,1	5–7	–
	отделочное	0,05–0,2	5, 6	–
Электроискровое шлифование		2,5–3,2	8–10	–
Электроконтактное сверление		2,5–100	12–14	–
Электрополирование	декоративное никелевых покрытий	0,4–3,2	6–9	–
		0,4–0,8		–
Нарезание резьбы фрезой		(1,6)3,2–6,3	8	–
Шлифование резьбы		(0,4)1,6–3,2	4–6	–
Накатывание резьбы роликами		0,4–0,8	6–8	–
Ультразвуковая обработка твердых сплавов		0,2–0,8	–	–

Примечание. В скобках указаны предельно достижимые значения  $R_a$ .



*Учебное издание*

**Шахлевич Григорий Михайлович**  
**Костюкевич Анатолий Александрович**  
**Пипко Генрих Моисеевич**

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. И. Герман*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 05.12.2014. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 100 экз. Заказ 96.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
220013, Минск, П. Бровки, 6