

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

Кафедра электронной техники и технологии

Г. М. Шахлевич, Е. В. Телеш

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Практикум

для студентов специальностей
«Экономика и управление на предприятии»,
«Маркетинг»
всех форм обучения

В 2-х частях

Часть 1

**Материалы и технология
деталей изделий радиоэлектроники**

Минск 2008

УДК 621.7 (076)

ББК 30.3 я 73

Ш 31

Шахлевич, Г. М.

- Ш 31 Производственные технологии: практикум для студ. спец. «Экономика и управление на предприятии», «Маркетинг» всех форм обуч. : В 2 ч. Ч.1 : Материалы и технология деталей изделий радиоэлектроники / Г. М. Шахлевич, Е. В. Телеш. – Минск : БГУИР, 2008. – 52 с. : ил.
ISBN 978-985-488-204-8 (ч. 1)

Практикум составлен в соответствии с типовыми и рабочими программами дисциплины «Производственные технологии». Часть I практикума охватывает вопросы технологических особенностей типов производства, составления плана обработки, определения припусков под обработку, расчета режимов резания и технической нормы времени.

Предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний, а также приобретения практических навыков проектирования технологических процессов и решения сопутствующих задач.

УДК 621.7 (076)

ББК 30.3 я 73

ISBN 978-985-488-204-8 (ч. 1)

ISBN 978-985-488-202-4

© Шахлевич Г. М., Телеш Е. В., 2008

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2008

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Практическое занятие №1. Химическая связь и строение вещества | 4 |
| Практическое занятие №2. Проводниковые материалы | 11 |
| Практическое занятие №3. Полупроводниковые материалы | 18 |
| Практическое занятие №4. Диэлектрические материалы | 24 |
| Практическое занятие №5. Технологические особенности типов производства | 30 |
| Практическое занятие №6. Составление плана обработки (технологического маршрута) | 34 |
| Практическое занятие №7. Расчет припусков на обработку и промежуточных размеров в отливке корпусной детали | 40 |
| Практическое занятие №8. Расчет технической нормы времени | 49 |
| Литература | 52 |

Библиотека БГУИР

Химическая связь и строение вещества

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Существует четыре основных вида химической связи: ионная (гетерополярная), ковалентная (гомополярная), металлическая и молекулярная (ван-дер-ваальсова). Первые три называются первичными, так как они относительно прочные и возникают вследствие обмена или объединения валентных электронов. Число находящихся в связи соседних ионов называется *координационным числом*.

$$\text{Полная энергия ионной связи} \quad E_i = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{a} + \frac{b}{a^n},$$

где Z_1 и Z_2 – заряды взаимодействующих ионов; a – расстояние между ними; b – константа сил отталкивания; $6 < n < 12$ (b и n определяются экспериментально).

Силы, возникающие между разноименно заряженными ионами, определяются по формуле

$$F = \frac{dE}{da} = -\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{a^2} - n \frac{b}{a^{n+1}}.$$

В ионных бинарных соединениях устойчивы только кристаллические решетки, в которых меньший по размеру катион окружен более крупными катионами, т.е. координационное число зависит от соотношения их радиусов.

Ковалентная связь – направленная, т.к. образуется за счет спаривания электронов соседних атомов. Координационное число в таких кристаллах зависит также от валентности атомов.

Полное кристаллографическое описание кристалла дают форма и размеры элементарной ячейки, а также распределение в ней частиц вещества. Элементарная ячейка строится на векторах элементарных трансляций \mathbf{a} , \mathbf{b} и \mathbf{c} и представляет собой наименьший объем кристалла, обладающий всеми его свойствами. В общем случае ее характеризуют, кроме векторов \mathbf{a} , \mathbf{b} и \mathbf{c} , три угла между ними α , β , γ .

Уравнение плоскости, пересекающей оси x , y , z кристаллической решетки в точках u , v , w имеет следующий вид:

$$\frac{x}{u} = \frac{y}{v} = \frac{z}{w}, \text{ отсюда } h \cdot x + k \cdot y + l \cdot z = 1,$$

где h , k , l – числа, обратные величине отрезков, отсекаемых плоскостью на соответствующих осях x , y , z , называемые *индексами Миллера*. Индексами

(hkl) обозначают как отдельную плоскость, так и набор параллельных плоскостей.

Для задания направления в кристалле выбирается прямая, проходящая через начало координат и первый узел, лежащий на этой прямой. То есть направление [hkl] определяется как набор наименьших целых чисел, пропорциональных длинам векторов, направленных вдоль осей элементарной ячейки, которые в сумме составляют вектор этого направления. В кубических кристаллах направление перпендикулярно плоскости, имеющей те же индексы (hkl).

Совокупность физически эквивалентных направлений (семейство направлений) обозначается как <hkl>, а плоскости, эквивалентные по характеру симметрии (как шесть граней куба, например), составляют семейство плоскостей и обозначаются {hkl}.

Большинство металлов и сплавов кристаллизуется в высокосимметричных решетках с плотной упаковкой атомов: кубических объемноцентрированных (ОЦК) и гранецентрированных (ГЦК) и гексагональных ГПУ (рис 1.1).

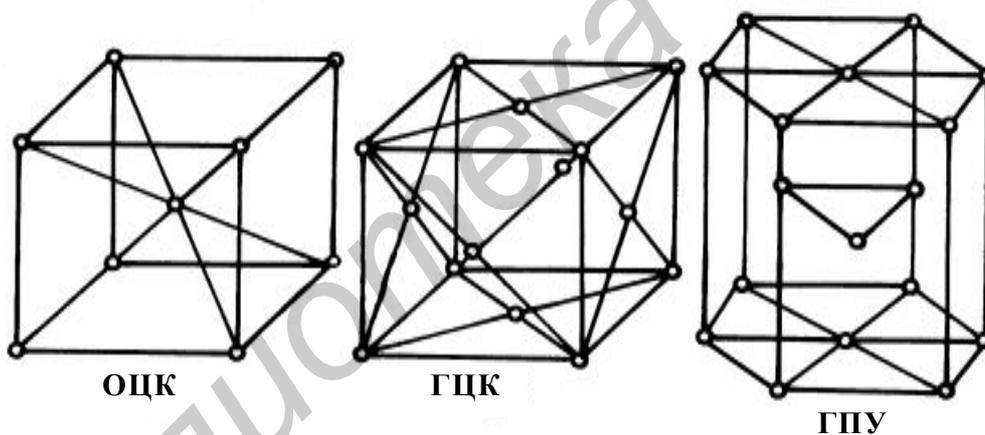


Рис. 1.1. Типы кристаллических решеток металлов и сплавов

Закон дифракции Вульфа–Брэгга выражается уравнением

$$2d_{hkl} \cdot \sin \theta = n\lambda,$$

где d_{hkl} – расстояние между плоскостями (hkl); θ – угол отражения; λ – длина волны излучения. Для кубических решеток

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}.$$

Число атомов, содержащихся в объеме вещества массой m , равно $n = \frac{m \cdot N_0}{A}$, где N_0 – число Авогадро; A – атомная или молекулярная масса.

Концентрация точечных дефектов по Френкелю и Шоттки определяется по формуле

$$n_{\Phi} = \sqrt{N \cdot N'} \cdot \exp\left(-\frac{W_{\Phi}}{2kT}\right);$$

$$n_{\text{Ш}} = N \cdot \exp\left(-\frac{W_{\text{Ш}}}{kT}\right),$$

где N и N' – концентрации узлов и междоузлий в решетке; W_{Φ} и $W_{\text{Ш}}$ – энергии образования соответствующего дефекта.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Пара противоположно заряженных двухвалентных ионов находится в связи на равновесном расстоянии $a = 0,24$ нм. Показатель степени в выражении для энергии отталкивания $n = 9$. Найти энергию разделения ионов.

Решение:

В состоянии равновесия при $a = 0,24$ нм силы притяжения и отталкивания уравновешены:

$$F = \frac{dE}{da} = -\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{a^2} - n \frac{b}{a^{n+1}} = 0.$$

Отсюда следует: $\frac{4e^2}{a^2} = \frac{9b}{a^{10}}$ и $b = \frac{4a^8 e^2}{9}$, тогда

$$E_{\infty} - E_0 = 0 - \left[-\frac{4e^2}{a} - \frac{4a^8 e^2}{9a^9} \right] = \frac{32e^2}{9a} = \frac{32(1,6 \cdot 10^{19})^2}{9 \cdot 0,24 \cdot 10^{-9}} = 38 \cdot 10^{-29} \text{ Дж.}$$

Задача 1.2. Каждая С-С-связь в кристалле алмаза имеет энергию $W_{\text{СВ}} = 3,7$ эВ. Сколько энергии необходимо затратить для испарения $m = 0,1$ г алмаза?

Решение:

Число атомов в объеме вещества массой m выражается через число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{26}$ (кг · моль)⁻¹ и молярную массу M (для углерода $M = 12$):

$$n = \frac{m \cdot N_{\text{O}}}{M} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 6,02 \cdot 10^{26}}{12} = 5 \cdot 10^{21}.$$

Каждый атом углерода в ковалентном алмазе участвует в четырех связях, но поскольку испарение происходит с поверхности вещества, необходимо разорвать в среднем две связи. Поэтому для испарения необходима энергия (одновременно переводим эВ в Дж) в количестве

$$W_{\text{исп}} = 2n \cdot W_{\text{св}}(\text{эВ}) \cdot e(\text{Кл}) = 2 \cdot 5 \cdot 10^{21} \cdot 3,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 5920 \text{ Дж}.$$

Задача 1.3. Удельная поверхностная энергия стекла при температуре 650 °С равна $e_{\text{с}} = 0,3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$. Какая энергия ΔE выделится при сфероидизации нити длиной $l = 0,1 \text{ м}$ и диаметром $d = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$?

Решение:

Объем нити $V_{\text{Н}} = \pi r^2 \cdot l$, а шара $V_{\text{Ш}} = \frac{4}{3} \pi R^3$. Поскольку $V_{\text{Н}} = V_{\text{Ш}}$,

то

$$\pi r^2 \cdot l = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad \text{и} \quad R = \sqrt[3]{\frac{3}{4} r^2 l} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Площадь поверхности нити $S_{\text{Н}} \approx 2\pi r \cdot l$, а шара $S_{\text{Ш}} = 4\pi R^2$.

При сфероидизации выделится энергия, равная разности их поверхностных энергий:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{\text{Н}} - E_{\text{Ш}} = e_{\text{с}} \cdot S_{\text{Н}} - e_{\text{с}} \cdot S_{\text{Ш}} = e_{\text{с}} (2\pi r \cdot l - 4\pi R^2) = 2\pi \cdot e_{\text{с}} (r \cdot l - 2R^2) = \\ &= 2 \cdot 3,14 \cdot 0,3 (10^{-6} - 2 \cdot 4 \cdot 10^{-8}) = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Задача 1.4. Вычислите изменение объема железа при его полиморфном превращении, если радиусы атомов Fe в плотной объемно-центрированной упаковке равны $r_{\text{ОЦК}} = 0,1241 \text{ нм}$, а в гранецентрированной – $r_{\text{ГЦК}} = 0,127 \text{ нм}$.

Решение:

Определим размеры элементарных ячеек железа:

– в элементарной ГЦК-ячейке (см. рис.1, а) содержится – $\frac{1}{8} \cdot 8 + \frac{1}{2} \cdot 6 = 4$ ато-

ма, а в ОЦК-ячейке (см. рис.1, б) – $\frac{1}{8} \cdot 8 + 1 = 2$ атома;

– на диагонали грани ГЦК-ячейки, равной $a\sqrt{2}$, размещается два атома, т.е.

$$a\sqrt{2} = 4R \quad \text{и} \quad a_{\text{ГЦК}} = \frac{4R_{\text{ГЦК}}}{\sqrt{2}};$$

– на пространственной диагонали длиной $a\sqrt{3}$ ОЦК-ячейки также должно располагаться два атома, следовательно, $a_{\text{ОЦК}} = \frac{4R_{\text{ОЦК}}}{\sqrt{3}}$.

$$\text{Тогда} \quad V_{\text{ГЦК}} = a_{\text{ГЦК}}^3 = \left(\frac{4R_{\text{ГЦК}}}{\sqrt{2}}\right)^3 = (4 \cdot 0,127 / \sqrt{2})^3 = 0,0462 \text{ нм}^3;$$

$$V_{\text{ОЦК}} = a_{\text{ОЦК}}^3 = \left(\frac{4R_{\text{ОЦК}}}{\sqrt{3}}\right)^3 = (4 \cdot 0,1242 / \sqrt{3})^3 = 0,04694 \text{ нм}^3.$$

Относительное изменение объема железа при полиморфном превращении равно $\frac{\Delta V}{V_{\text{ОЦК}}} = \frac{(0,04694 - 0,0462)}{0,0462} = 1,6 \text{ об.}\%$.

Задача 1.5. Какова концентрация свободных электронов в алюминии, имеющем ГЦК-решетку с периодом $a = 0,4041 \text{ нм}$, если на каждый атом приходится три таких электрона?

Решение:

В ГЦК-решетке на одну элементарную ячейку (см. задачу 4) приходится четыре атома, поэтому количество атомов в единице объема равно

$$n = \frac{4}{a^3} = \frac{4}{(0,4041 \cdot 10^{-9})^3} = 6,06 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3},$$

а концентрация электронов $n_e = 3n = 18,18 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Задача 1.6. Вычислите период кристаллической решетки меди, если ее плотность $d = 8920 \text{ кг/м}^3$, элементарная ячейка – ГЦК. Какой объем приходится на один атом?

Решение:

Рентгеновская плотность следующим образом связана с периодом кубической решетки $d = \frac{km}{a^3}$,

где m – масса атома; k – число атомов в элементарной ячейке.

В ГЦК-ячейке $k = 4$. Учитывая, что $m = \frac{A}{N_A}$, атомный вес Cu $A = 63,54$,

$$a = \sqrt[3]{\frac{k \cdot A}{d \cdot N_A}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 63,54}{8920 \cdot 6,02 \cdot 10^{26}}} = 3,72 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,372 \text{ нм}.$$

Задача 1.7. Рефлекс от плоскости (111) на рентгенограмме меди, снятой при длине волны рентгеновского излучения $\lambda = 0,15405$ нм, наблюдается под углом $2q = 43^\circ$.

Найти период ГЦК-решетки a и атомный радиус r_a меди.

Решение:

Из уравнения Вульфа–Брэгга следует, что $l = 2 \cdot d_{111} \cdot \sin q$, тогда

$$d_{111} = \frac{l}{2 \sin q} = \frac{0,15405}{2 \sin 21,5^\circ} = 0,21 \text{ нм.}$$

Для кубической решетки $d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$, отсюда

$$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} = d_{111} \sqrt{3} = 0,36 \text{ нм}$$

(экспериментальное значение $a = 0,3556$ нм).

На диагонали грани ГЦК-решетки находится (см. рис.1, б) два атома, тогда $r = \frac{a\sqrt{2}}{4} = 0,128$ нм.

Задачи для самостоятельного решения

1. Сколько атомов располагается на 1 мм^2 плоскостей (100) и (111) ГЦК-свинца, если минимальное межатомное расстояние в его решетке равно $0,35$ нм?

Ответ: $8,2 \cdot 10^{12}$ и $9,5 \cdot 10^{12}$.

2. В молекуле воды угол связи $H - O - H$ равен $104,5^\circ$, а расстояние между ионами O^{2-} и H^+ – $0,107$ нм. Вычислить электрический дипольный момент молекулы, предполагая связь O и H ионной.

Ответ: $6,2 \cdot 10^{-29}$ Кл·м.

3. Расстояние между ближайшими атомами в ОЦК-решетке вольфрама равно $0,2737$ нм. Найдите плотность материала (считать, что структура плотноупакованная).

Ответ: $19\,350 \text{ кг/м}^3$.

4. Ион фтора имеет радиус $0,133$ нм. Каков радиус наименьшего одновалентного, положительного иона, который может соседствовать с шестью ионами фтора? Рассматривать предельный случай «касания» анионов.

Ответ: $0,059$ нм.

5. При температуре, на 10 К меньшей температуры плавления алюминия ($T_{пл} = 933 \text{ К}$), на долю вакансий приходится 0,08 % мест в кристаллической решетке, а при 484 К – 0,01 % мест. Чему равна энергия образования вакансии? Сколько вакансий присутствует в 1 см^3 при 527 К? Считать, что вакансии образуются за счет ухода атомов к поверхности.

Ответ: $1,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$; $1,1 \cdot 10^{19}$.

6. Кристалл цинка имеет плотноупакованную гексагональную решетку (ГПУ) с постоянными $a = 0,266 \text{ нм}$ и $c = 0,495 \text{ нм}$. Найти плотность цинка и объем элементарной ячейки. Молярная масса цинка $M = 6,537 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$.

Ответ: $3,03 \cdot 10^{-29} \text{ м}^{-3}$; $7,16 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

7. Для пучка рентгеновских лучей с длиной волны $\lambda = 0,1537 \text{ нм}$, падающего на кристалл ГЦК алюминия, наблюдается отражение первого порядка от плоскостей (111) под углом $\theta = 19^{\circ}20'$. Определить число Авогадро, если известно, что плотность алюминия $d = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, молярная масса $M = 2,698 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$.

Ответ: $6,1 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

8. Определите индексы Миллера плоскости, отсекающей на осях кубической решетки отрезки $A = a$, $B = 0,5 a$, $C = 1,5 a$, и индексы направлений, проходящих через начало координат вдоль диагоналей решетки.

Ответ: (362), [110], [101], [011], [111].

Проводниковые материалы

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Характерная особенность проводников – сильно выраженная электропроводность. Она обусловлена высокой концентрацией свободных носителей заряда. Их основные параметры: удельные электропроводность σ (См/м) и сопротивление ρ (Ом·м), температурный коэффициент сопротивления α_p (K^{-1}), скорость дрейфа V_d (м/с), подвижность μ $m^2/V \cdot s$, длина свободного пробега l (м) носителей заряда и др. Они связаны следующими соотношениями:

$$r = \frac{1}{s}; \quad \alpha_p = \frac{1}{r} \frac{\Delta r}{\Delta T}; \quad s = en \frac{V_d}{E},$$

где e – заряд; n – концентрация носителей тока; E – напряженность электрического поля.

Закон Ома в дифференциальной форме для плотности тока в проводнике:

$$j = enmE = sE.$$

Энергия, выделяемая в проводнике при протекании по нему тока, равна

$$Q = U \cdot J \cdot t = \frac{U^2 \cdot t}{R} = J^2 \cdot R \cdot t.$$

Из классической теории проводимости электронного газа следует, что

$$r = \frac{2m_e \cdot V_T}{e^2 \cdot n \cdot l_{cc}},$$

где V_T – тепловая скорость; l_{cc} – средняя длина свободного пробега; m_e – масса носителей тока.

Квантово-механическая теория электропроводности металлов даёт следующую формулу нахождения сопротивления:

$$r = \left(\frac{3}{8p} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{h}{e^2 \cdot n^{\frac{2}{3}} \cdot l_{cc}}.$$

Сопротивление протеканию электрического тока связано с рассеиванием носителей заряда на тепловых колебаниях атомов, дефектах структуры, примесях и др. При температурах, близких к 0 К, тепловые колебания практиче-

ски отсутствуют, поэтому рассеивание электронов происходит только на структурных дефектах и примесях и удельное сопротивление металла можно представить в соответствии с правилом Маттисена в виде

$$r = r_{\text{тепл}}(T) + r_{\text{деф}} + r_{\text{прим}},$$

где $r_{\text{тепл}}(T)$ – зависящее от температуры ρ бездефектного металла; $r_{\text{деф}}$ и $r_{\text{прим}}$ – вклад в r , обусловленный дефектами и примесями ($r_{\text{ост}}$).

Ряд металлов и сплавов при температуре ниже критической переходят в сверхпроводящее состояние. При этом их сопротивление скачком уменьшается на 12–18 порядков.

Для чистых непереходных металлов a_p приблизительно равно $4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Переходные и ферромагнитные материалы имеют повышенное a_p ($\sim 10^{-2} \text{ K}^{-1}$).

Согласно правилу Линде изменение на 1 ат.% концентрации примеси увеличивает $r_{\text{ост}}$ на $\Delta r_{\text{ост}} = b \cdot (\Delta Z)^2$, где ΔZ – разность валентностей основного металла и примеси, b – постоянный для данной пары коэффициент.

Глубина проникновения переменного электрического поля в проводник равна

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu m_0}} = \frac{1}{\sqrt{p f \mu m_0}},$$

где ω и f – угловая скорость и частота, μ – относительная магнитная проницаемость материала; m_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}$).

Примеры решения задач

Задача 2.1. Определить время, в течение которого электрон пройдет $l = 1$ км по медному проводу, если его $\rho = 0,017 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, $U = 220 \text{ В}$. За какое время электрон прошел бы это расстояние, двигаясь без соударений?

Решение

Из закона Ома следует, что $s = \frac{1}{r} = en \frac{V_d}{E}$.

Концентрация электронов (1 электрон на атом) в меди равна $n = d \frac{N_A}{A}$.

$$V_d = \frac{E}{r \cdot e \cdot n} = \frac{U \cdot A}{r \cdot e \cdot d \cdot N_A \cdot \mathbf{l}} = 9.6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Сравним эту величину с тепловой скоростью носителей.

$$\text{Так как } r = \frac{2m_e \cdot V_T}{e^2 \cdot n \cdot \mathbf{l}_{cc}}; \mathbf{l}_{cp} \approx 3.9 \cdot 10^{-8} \text{ м; } V_T = \frac{r \cdot e^2 \cdot n \cdot \mathbf{l}_{cp}}{2m} \approx 7.8 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

$$\text{Время дрейфа определяется по } \mathbf{l} = 10^3 \text{ м: } t = \frac{\mathbf{l}}{V_d} = 10^6 \text{ с.}$$

При отсутствии столкновений электрон двигался бы равноускоренно под действием силы $F = eE$, тогда, $E = \frac{U}{l}$ и

$$t_{np} = \sqrt{\frac{2l}{a}} = \sqrt{\frac{2\mathbf{l}^2 m}{eU}} = 2.26 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Задача 2.2. Докажите, что между ТКС a_R и ТКЛР a_1 проводника существует следующая взаимосвязь: $a_p = a_R + a_1$.

Решение

По определению $a_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$. Предположим, что резистор имеет форму прямоугольного параллелепипеда длиной \mathbf{l} и квадратное основание со стороной a . Тогда $R = r \frac{\mathbf{l}}{a^2}$.

В этом выражении от температуры зависят R, r, \mathbf{l} и a .

$$\text{Поэтому } \frac{dR}{dT} = \frac{\mathbf{l}}{a^2} \frac{dr}{dT} + \frac{r}{a^2} \frac{d\mathbf{l}}{dT} - 2 \frac{r\mathbf{l}}{a^3} \frac{da}{dT}.$$

Разделим обе части на $R = r \frac{\mathbf{l}}{a^2}$.

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{\mathbf{l}}{a^2} \cdot \frac{a^2}{r \cdot \mathbf{l}} \frac{dr}{dT} + \frac{r \cdot a^2}{a^2 \cdot r \cdot \mathbf{l}} \cdot \frac{d\mathbf{l}}{dT} - 2 \frac{r \cdot \mathbf{l} \cdot a^2}{r \cdot \mathbf{l} \cdot a^3} \frac{da}{dT}.$$

$$\text{После сокращений получим } a_R = \frac{1}{r} \frac{dr}{dT} + \frac{1}{\mathbf{l}} \frac{d\mathbf{l}}{dT} - 2 \frac{1}{a} \frac{da}{dT}.$$

Для изотропного материала: $a_1 = a_a$, т.е.

$$a_R = a_p - a_1 \text{ или } a_p = a_R + a_1, \text{ что и требовалось доказать.}$$

Задача 2.3. Требуется изготовить проволоку, которая выдерживает растяжение $F = 50$ Н без пластической деформации, причем её сопротивление должно быть $\leq 0,02$ Ом. Определить и сравнить наименьший допустимый диаметр проволоки. Какая проволока экономически более выгодна, если цена алюминия в 1,5 раза ниже цены меди? (Для отожженных Cu и Al $s_T(Cu) = 70$ МПа; $s_T(Al) = 35$ МПа).

Решение

Наименьший D_{\min}^F , при котором отсутствует пластическая деформация, равен

$$s_T = \frac{4F}{pD^2}; \quad D_{\min}^F = \sqrt{\frac{4F}{ps_T}}.$$

Наименьший D_{\min}^R , при котором обеспечивается требуемое R при заданной l , равен

$$R = r \frac{l}{S} = r \frac{4l}{p(D^R)^2}; \quad D_{\min}^R = \sqrt{\frac{4r \cdot l}{pR}}.$$

Для меди $D^F = \sqrt{\frac{4 \cdot 50}{3,14 \cdot 10^6 \cdot 70}} = 0,95 \cdot 10^{-3}$ м,

$$D^R = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,017 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,02}} = 1,04 \cdot 10^{-3}$$
 м.

Выбираем 1,04 мм.

Для алюминия $D^F = \sqrt{\frac{4 \cdot 50}{3,14 \cdot 35 \cdot 10^6}} = 1,35 \cdot 10^{-3}$ м;

$$D^R = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,028 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,02}} = 1,335 \cdot 10^{-3}$$
 м.

Выбираем 1,35 мм.

Выражение для расчета стоимости одного метра проволоки

$$C = C_0 \cdot p \cdot D_{\min}^2 \cdot l \cdot \frac{d}{4},$$

где d – плотность металлов.

Тогда $\frac{C_{Cu}}{C_{Al}} = \frac{C_{0Cu}}{C_{0Al}} \cdot \frac{d_{Cu}}{d_{Al}} \cdot \frac{D_{Cu}^2}{D_{Al}^2} = \frac{1,5 \cdot 8900 \cdot (1,04)^2}{2700 \cdot (1,35)^2} = 2,93.$

Задача 2.4. Вычислить длину свободного пробега электронов в меди при $T = 300$ К, если ее удельное сопротивление при этой температуре равно $0,017$ мкОм/м. Плотность меди $d = 8920$ кг/м³, атомная масса $M = 63,54$.

Решение

Согласно представлениям квантовой теории, удельное сопротивление r металлов связано с длиной свободного пробега электронов l соотношением

$$r = \left(\frac{3}{8\rho} \right)^{1/3} \cdot \frac{h}{e^2 n^{2/3} l}.$$

Концентрация электронов проводимости в меди с учетом того, что на каждый атом приходится один свободный электрон, равна

$$n = d \frac{N_0}{A} = \frac{8920 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{63,54 \cdot 10^{-3}} = 8,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Отсюда следует, что длина свободного пробега

$$l = \left(\frac{3}{8 \cdot 3,14} \right)^{1/3} \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot (8,45 \cdot 10^{28})^{2/3} \cdot 0,017 \cdot 10^{-6}} = 3,89 \cdot 10^{-8} \text{ м}.$$

Задача 2.5. Имеется два проводника, прошедших одинаковую технологическую обработку. Химическим анализом установлено, что состав первого проводника – (Cu+0.5 ат.% Zn), второго – (Cu+0.5 ат.% As). Определить, какой материал имеет более высокую удельную проводимость.

Решение

Согласно правилу Линде, измерение остаточного сопротивления на 1 ат. % примеси $\Delta r_{\text{ост}} = b \cdot (\Delta Z)^2$, где ΔZ – разность валентностей металла-растворителя (меди) и примесного атома. Константа b одинакова для атомов примесей одного периода периодической системы элементов, например для цинка и мышьяка. Так как медь одновалентна, то при введении цинка $\Delta Z = 1$, а при введении мышьяка $\Delta Z = 4$. Следует принять во внимание, что остаточное сопротивление линейно зависит от концентрации x примесных атомов. Тогда

$$r = r_T + r_{\text{ост}} = r_T + b(\Delta Z_2)^2 x,$$

откуда

$$r_2 - r_1 = b(\Delta Z_2)^2 x_{\text{As}} - b(\Delta Z_1)^2 x_{\text{Zn}} = b \cdot (16 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2}) = 0,06 b.$$

Таким образом, первый материал обладает меньшим удельным сопротивлением, т.е. более высокой удельной проводимостью.

Задача 2.6. Стержень из графита соединен последовательно с медным стержнем того же сечения. Определить, при каком соотношении их длин сопротивление этой композиции не зависит от температуры. Удельные сопро-

тивления меди и графита равны соответственно 0,017 и 8,0 мкОм·м, а значения a_p составляют $4,3 \cdot 10^{-3}$ и -10^{-3} К^{-3} .

Решение

Сопротивление композиции не будет изменяться с температурой, если

$$\Delta R(T)_{\text{Cu}} = \Delta R(T)_{\text{C}}.$$

При линейном изменении сопротивления с изменением температуры, если пренебречь изменением размеров проводников, можно записать

$$R_{\text{Cu}} \cdot a_{\text{Cu}} \cdot \Delta T = R_{\text{C}} \cdot a_{\text{C}} \cdot \Delta T.$$

После сокращений и подстановок получаем

$$\frac{1}{S_{\text{Cu}}} \cdot r_{\text{Cu}} \cdot a_{\text{Cu}} \cdot l_{\text{Cu}} = \frac{1}{S_{\text{C}}} \cdot r_{\text{C}} \cdot a_{\text{C}} \cdot l_{\text{C}}, \text{ по условию } S_{\text{Cu}} = S_{\text{C}} \text{ и}$$

$$\frac{l_{\text{Cu}}}{l_{\text{C}}} = \frac{a_{\text{C}} \cdot r_{\text{C}}}{a_{\text{Cu}} \cdot r_{\text{Cu}}} = \frac{8,0 \cdot 10^{-3}}{4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,017} = 109,4.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Удельное сопротивление серебра при комнатной температуре равно 0,015 мкОм·м, а температурный коэффициент удельного сопротивления составляет $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-3}$. Определить, как и во сколько раз изменяется длина свободного пробега электронов при нагревании проводника от 300 до 1000 К.

Ответ: уменьшится в 3,7 раза.

2. В медном проводнике под действием электрического поля проходит электрический ток плотностью 1 А/мм². Определить скорость дрейфа и ее отношение к средней тепловой скорости движения электронов при температуре 300 К.

Ответ: $V_{\text{д}} = 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$; $V_{\text{д}}/V_{\text{T}} = 6,1 \cdot 10^{-11}$.

3. При включении в электрическую цепь проводника диаметром 0,5 мм и длиной 43 мм разность потенциалов на концах проводника составила 2,4 В при токе 2 А. Определить удельное сопротивление материала проводника.

Ответ: $5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

4. Удельное сопротивление медного проводника, содержащего 0,5 ат.% индия, равно 0,0234 мкОм·м. Определить концентрацию атомов индия в сплаве с удельным сопротивлением 0,0298 мкОм·м, полагая, что все остаточное сопротивление обусловлено рассеянием на примесных атомах.

Ответ: 0,98 ат.% или $8,28 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$.

5. Определить температурный коэффициент линейного расширения α_l и удлинение Δl нихромовой проволоки, если известно, что при повышении температуры от 20 до 1000 °С сопротивление проволоки изменяется от 50 до 56,6 Ом. Длина проволоки в холодном состоянии $l = 50$ м. Температурный коэффициент удельного сопротивления нихрома $\alpha_p = 15 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Ответ: $1,35 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; 0,735 м.

6. Ток в замкнутом контуре из сверхпроводящего материала в течение года уменьшился в результате релаксации системы на 0,01 %. Принимая концентрацию электронов проводимости равной $4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, оцените удельное сопротивление материала в сверхпроводящем состоянии и сравните его с r меди в нормальных условиях.

Ответ: $3,54 \cdot 10^{32} \text{ См/м}$; $1,66 \cdot 10^{-25}$.

7. Определите отношение глубин проникновения электромагнитного поля в алюминиевый и стальной проводники при частоте 50 Гц и 1 МГц. Полагать, что $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $m_{\text{Cu}} = 1$, $m_{\text{Fe}} = 1000$, $r_{\text{Fe}} = 0,1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Ответ: на обеих частотах $\Delta_{\text{Al}}/\Delta_{\text{Fe}} = 16,33$.

8. Для отопления используют камин, включенный в сеть напряжением 220 В. Помещение теряет в сутки 10^5 кДж теплоты. Требуется поддерживать температуру в нем неизменной. Найти: сопротивление нагревательного элемента; длину нихромовой проволоки диаметром 0,7 мм, использованной для его намотки; мощность нагревателя. Считать для нихрома $r = 1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Ответ: 41,8 Ом; 16,1 м; 1,16 кВт.

Полупроводниковые материалы

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Основными электрофизическими параметрами полупроводниковых материалов являются ширина запрещенной зоны ΔE_g , положение уровня Ферми E_F , удельное объемное сопротивление r_V или электропроводность S , концентрация собственных носителей заряда $p = \sqrt{N_V N_A} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right)$, концентрация донорной примеси N_n , концентрация акцепторной примеси N_p , подвижность носителей m_n и m_p , время жизни неравновесных или неосновных носителей t_n и t_p .

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется выражением

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = E_i + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c},$$

где E_i – уровень, соответствующий середине запрещенной зоны; $m_v = 0,33m_0$, N_c – эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно

$$N_V = \frac{2(2pm_p^*kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}; \quad N_c = \frac{2(2pm_n^*kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3},$$

где m_p , m_n – эффективные массы электронов и дырок.

Электропроводность собственного полупроводника определяется как

$$S = en_i(m_n + m_p),$$

где e – заряд электрона. В то же время концентрация собственных носителей равна

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right).$$

Для собственного полупроводника применимо соотношение «действующих масс»:

$$n_i^2 = n \cdot p.$$

Концентрации носителей в донорных ($n \gg p$) и акцепторных ($p \gg n$) полупроводниках равны

$$n = \sqrt{N_c N_d} \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right), \quad p = \sqrt{N_v N_a} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right).$$

Электропроводность примесного полупроводника равна

$$S = en\mu_n + ep\mu_p,$$

где n – концентрация электронов, а p – концентрация дырок.

Скорость дрейфа носителей в электрическом поле с напряженностью E определяется выражением

$$V = mE.$$

Плотность тока носителей через полупроводник при приложенной напряженности внешнего поля E будет равна

$$J = SE.$$

Концентрации носителей заряда в полупроводниках связаны с одновременно протекающими процессами их генерации и рекомбинации. Скорость рекомбинации определяется в основном концентрацией и временем жизни неосновных или неравновесных носителей заряда, которое определяется по формуле

$$t = \frac{L^2}{D},$$

где L – диффузионная длина неосновных носителей заряда, а D – коэффициент диффузии неосновных носителей, который можно найти из соотношения Эйнштейна:

$$D = \frac{m \cdot kT}{e}.$$

Убывание концентрации неравновесных носителей заряда в зависимости от времени и расстояния до места возбуждения определяется по формулам

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_n}\right), \quad n - n_0 = \Delta n_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D_n \cdot t_n}}\right).$$

Примеры решения задач

Задача 3.1. Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300 К, если известно, что ширина его запрещенной зоны $\Delta E_g = 0,665$ эВ,

а эффективные массы плотности состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны

$m_v = 0,33 m_0$; $m_c = 0,55 m_0$, где m_0 – масса свободного электрона.

Решение

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется по формуле

$$E_F = \frac{W_c + W_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_c} = E_i + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_c},$$

где E_F – уровень, соответствующий середине запрещенной зоны;

$$N_V = \frac{2(2pm_vkT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}; \quad N_c = \frac{2(2pm_ckT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}$$

– эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно, в данном случае

$$N_V = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,388 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{\frac{3}{2}}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} = 6,04 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3};$$

$$N_c = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,55 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{\frac{3}{2}}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} = 1,02 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Таким образом,

$$E_F - E_i = \frac{8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300}{2} \ln \frac{6,04 \cdot 10^{24}}{1,02 \cdot 10^{25}} = -0,78 \cdot 10^{-3} \text{ эВ.}$$

Или

$$\begin{aligned} E_F - E_v &= E_F - E_i + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_c} = \Delta E_g / 2 + kT \ln \frac{N_V}{N_c} = \\ &= 0,665/2 - 6,78 \cdot 10^{-3} = 0,326 \text{ эВ,} \end{aligned}$$

т.е. уровень Ферми в собственном германии при комнатной температуре расположен на 6,78 мэВ ниже середины запрещенной зоны, но на 326 мэВ выше потолка валентной зоны. Результаты расчета показывают, что с ростом температуры уровень Ферми приближается к той зоне, которая имеет меньшую плотность состояний и поэтому заполняется быстрее.

Задача 3.2. Рассчитать концентрацию электронов и дырок в германии р-типа с удельным сопротивлением 0,05 Ом·м при температуре 300 К. Данные: собственная концентрация носителей заряда при комнатной температуре $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $m_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, подвижность дырок $m_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Решение

Удельное сопротивление связано с концентрацией электронов и дырок уравнением

$$1/r = enm_n + epm_p = en_i^2 m_n / p + epm_p.$$

Для концентрации дырок получаем квадратное уравнение вида

$$p^2 - \frac{p}{em_p r} + \frac{n_i^2 m_n}{m_p} = 0.$$

Подставляя исходные данные, имеем

$$p^2 - 6,58 \cdot 10^{20} p + 9,03 \cdot 10^{38} = 0,$$

откуда $p = 6,565 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Второе решение квадратного уравнения отбрасываем, так как оно соответствует полупроводнику n-типа. Концентрация неосновных носителей заряда равна

$$n = n_i^2 / p = (2,1 \cdot 10^{19})^2 / (6,565 \cdot 10^{20}) = 6,72 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 3.3. Определить, при какой концентрации примесей удельная проводимость германия при температуре 300 К имеет наименьшее значение. Найти отношение собственной удельной проводимости к минимальной при той же температуре. Для решения использовать данные задачи 3.2.

Решение

Минимум удельной проводимости находим из условия $dg/dn = 0$. Учитывая, что

$$g = enm_n + erm_p = enm_n + \frac{en_i^2}{n} m_p,$$

после дифференцирования получим

$$em_n - en_i^2 m_p / n^2 = 0.$$

Решая это уравнение, находим

$$n = n_i \sqrt{\frac{m_p}{m_n}}; \quad p = n_i \sqrt{\frac{m_n}{m_p}}.$$

Для германия при 300 К получаем

$$n = 2,1 \cdot 10^{19} \sqrt{0,19/0,39} = 1,47 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3};$$

$$p = 2,1 \cdot 10^{19} \sqrt{0,39/0,19} = 3,01 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

Таким образом, минимальную удельную проводимость имеет слабо легированный полупроводник p -типа.

Учитывая, что собственная удельная проводимость определяется уравнением $g_i = en_i(m_n + m_p)$, находим искомое отношение:

$$\frac{g_i}{g_{\min}} = \frac{m_n + m_p}{2\sqrt{m_n \cdot m_p}} = \frac{0,39+0,19}{2\sqrt{0,39 \cdot 0,19}} = 1,065.$$

Задача 3.4. Через пластину кремния с удельным объемным сопротивлением 0,01 Ом·м проходит электрический ток плотностью 10 мА/мм². Найти средние скорости дрейфа электронов и дырок, если их подвижности равны 0,14 и 0,05 м²/(В·с) соответственно.

Решение

Скорость дрейфа электронов $V_n = m_n E$, а дырок $-V_p = m_p E$. Плотность тока через пластину кремния будет равна $J = sE = E/r_v$, откуда $E = Jr_v$. Следовательно, имеем

$$V_n = m_n Jr_v = 0,14 \cdot 10^3 \cdot 10^{-1} = 14 \text{ м/с} \text{ и } V_p = m_p Jr_v = 0,05 \cdot 10^2 = 5 \text{ м/с}.$$

Задача 3.5. В образце кремния n -типа при температуре $T = 300$ К время жизни неосновных носителей заряда $t_p = 5$ мкс, их подвижность $m_p = 0,04$ м²/(В·с). Определить диффузионную длину неосновных носителей заряда.

Решение

Из соотношения Эйнштейна находим коэффициент диффузии дырок:

$$D = \frac{m \cdot kT}{e} = \frac{0,04 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,035 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Диффузионная длина неосновных носителей заряда равна

$$L_p = \sqrt{D_p t_p} = \sqrt{1,03 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 7,19 \cdot 10^{-5} \text{ м} \approx 72 \text{ мкм.}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить положение уровня Ферми при $T = 300 \text{ К}$ в кристалле германия, легированного мышьяком до концентрации 10^{23} м^{-3} .

Ответ: 0,12 эВ.

2. Эпитаксиальный слой арсенида галлия, легированный серой, имеет при комнатной температуре удельное сопротивление $5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Определить концентрацию доноров в слое, если подвижность электронов $0,8 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Ответ: $1,56 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

3. При напряженности электрического поля 100 В/м плотность тока через полупроводник равна $6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Определить концентрацию электронов проводимости в полупроводнике, если их подвижность $0,375 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Дырочной составляющей тока можно пренебречь.

Ответ: 10^{22} м^{-3} .

4. К стержню из арсенида галлия длиной 50 мм приложено напряжение 50 В . За какое время электрон пройдет через весь образец, если подвижность электронов $0,9 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$?

Ответ: 56 мкс.

5. Через кристалл кремния n -типа с удельным объемным сопротивлением $0,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ пропускают электрический ток плотностью 200 мА/см^2 . За какое время электроны проходят расстояние 10 мкм , если их подвижность $0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$?

Ответ: 0,357 мкс.

6. Оценить тепловую и дрейфовую скорости электронов при 300 К в германии n -типа с концентрацией доноров $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, если плотность тока через образец 10^4 А/м^2 , а эффективная масса электронов проводимости $m_n = 0,12 m_0$.

Ответ: $V_T = 3,37 \cdot 10^5 \text{ м/с}$; $V_d = 6,25 \text{ м/с}$.

7. Определить время жизни и подвижность электронов в невырожденном германии при температуре 300 К , если диффузионная длина электронов $1,5 \text{ мм}$, коэффициент диффузии $9,8 \cdot 10^{-3}$.

Ответ: 230 мкс, $0,38 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Диэлектрические материалы

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Наиболее важными электрофизическими параметрами диэлектрических материалов являются относительная диэлектрическая проницаемость ϵ , тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}d$, электрическая прочность $E_{\text{пр}}$, удельные объемное r_v и поверхностное r_s сопротивления.

Поляризованность пропорциональна напряженности электрического поля:

$$P = \epsilon_0(\epsilon - 1)E.$$

Если диэлектрик изотропный, то векторы напряженности электрического поля и поляризованности совпадают по направлению, а электрическое смещение равно

$$D = \epsilon_0 E + P.$$

Кроме пассивного сопротивления, связанного с наличием свободных носителей заряда, диэлектрики обладают в отличие от проводников активным или емкостным сопротивлением, которое зависит от частоты внешнего электрического поля:

$$x_c = \frac{h}{2p \cdot f \cdot \epsilon_0 \epsilon \cdot S},$$

где h – толщина диэлектрика; f – частота внешнего электрического поля; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – площадь электродов.

Емкость плоского конденсатора равна

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{4p \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot S}{h},$$

где Q – заряд на пластинах; U – разность потенциалов; S – площадь пластин; h – толщина диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость зависит от температуры, поскольку изменяется прочность межатомных связей. В связи с этим вводится температурный коэффициент ϵ :

$$a_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{dT}.$$

В инженерной практике чаще используют понятие температурного коэффициента емкости (ТКЕ) конденсатора на основе данного диэлектрика, поскольку она изменяется пропорционально ϵ .

Значение диэлектрической проницаемости многокомпонентных диэлектриков определяют по формуле Лихтенеккера, которая, например, для двух составляющих имеет вид

$$\lg \epsilon_0 = c_1 \cdot \lg \epsilon_1 + c_2 \cdot \lg \epsilon_2,$$

где ϵ_i и c_i – относительные диэлектрические проницаемости и объемные концентрации компонентов ($c_1 + c_2 = 1$).

Для температурного коэффициента диэлектрической проницаемости

$$a_{\epsilon_0} = c_1 \cdot a_{\epsilon_1} + c_2 \cdot a_{\epsilon_2}.$$

В переменных электрических полях имеет место рассеяние мощности в диэлектрике из-за необратимых явлений, в том числе вследствие протекания токов смещения. На практике используют величину $\operatorname{tg} d$, которая входит в выражение для величины потерь в образце диэлектрика

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} d,$$

где ω – угловая скорость электрического поля ($\omega = 2\pi \cdot f$).

При достаточно больших напряженностях поля (больше 10^6 В/м) в диэлектриках возможен пробой, т.е. утрата изоляционных свойств. Электрическая прочность рассчитывается как

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d},$$

где $U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя диэлектрика толщиной d .

Примеры решения задач

Задача 4.1. Нормально вектору напряженности однородного электрического поля $E_0 = 100$ В/м расположена пластина изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$. Определить:

а) напряженность поля E и электрическое смещение (электрическую индукцию) D внутри пластины;

б) поляризованность диэлектрика P и плотность связанных зарядов σ .

Решение

а) Среднее макроскопическое электрическое поле E в диэлектрике в ϵ раз меньше внешнего: $E = 100/2 = 50$ В/м. Для большинства диэлектриков поляризованность пропорциональна напряженности поля:

$$P = \epsilon_0(\epsilon - 1)E = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2 - 1) \cdot 50 = 4,42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

Электрическое смещение равно

$$D = \epsilon_0 E + P = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 50 + 4,42 \cdot 10^{-10} = 8,85 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

б) Поляризованность однородного плоского диэлектрика в однородном электрическом поле равна поверхностной плотности связанных зарядов:

$$s = P = 4,42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

Задача 4.2. Вычислить поляризованность монокристалла каменной соли, считая, что смещение ионов под действием электрического поля от положения равновесия составляет 1% расстояния между ближайшими соседними ионами. Элементарная ячейка кристалла имеет форму куба, расстояние между соседними ионами $a = 0,28 \text{ нм}$.

Решение

Поляризованность диэлектрика P численно равна отношению электрического момента dp элемента диэлектрика к объёму dV этого диэлектрика: $P = dp/dV$. Если выбрать $dV = a^3$, то $dp = q\Delta x$, где q – заряд иона, равный заряду электрона; Δx – смещение ионов под действием поля.

Тогда

$$P = \frac{q\Delta x}{a^3} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,8 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-2}}{(0,28 \cdot 10^{-9})^3} \approx 0,02 \text{ Кл/м}^2.$$

Задача 4.3. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определить напряженность электрического поля, действующего на монокристалл каменной соли, если её диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 5,65$. Вычислить коэффициент упругой связи ионов $k_{\text{упр}}$ в кристалле, полагая, что напряженность внутреннего поля равна напряженности внешнего поля.

Решение

Поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности электрического поля. Отсюда

$$E = \frac{P}{\epsilon_0(\epsilon - 1)} = \frac{0,02}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (5,65 - 1)} = 4,85 \cdot 10^8 \text{ В/м}.$$

Так как смещению ионов под действием поля препятствуют силы упругой связи, то в состоянии равновесия $k_{\text{упр}}\Delta x = qE$. Отсюда

$$k_{\text{упр}} = \frac{qE}{\Delta x} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,85 \cdot 10^8}{0,28 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-2}} = 27,7 \text{ Дж/м}^2.$$

Задача 4.4. Между пластинами плоского конденсатора без воздушных промежутков зажат лист гетинакса толщиной $h = 1$ мм. На конденсатор подано напряжение $U = 200$ В. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора S_1 и на диэлектрике S_D . Диэлектрическую проницаемость материала принять равной шести.

Решение

Вследствие поляризации диэлектрика при подключенном источнике постоянного напряжения на пластинах конденсатора удерживается дополнительный заряд S_D , так что $S_1 = S_D + S_0$, где S_0 – поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора в отсутствие диэлектрика. Тогда

$$S_1 = e_0 e \cdot E = \frac{e_0 e \cdot U}{h} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 200}{10^{-3} \cdot 10^{-5}} \text{ Кл/м}^2;$$

$$S_D = P = e_0 e \cdot E - e_0 E \approx \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 200}{10^{-3}} \approx 8,85 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2.$$

Задача 4.5. Две противоположные грани куба с ребром $a = 10$ мм из диэлектрика с удельным объемным сопротивлением $r_v = 10^{10}$ Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением $r_s = 10^{10}$ Ом·м покрыты металлическими электродами. Определить ток, протекающий через эти грани куба при постоянном напряжении $U_0 = 2$ кВ.

Решение

Электрический ток протекает как через объем куба, так и по поверхности четырех боковых граней. Поэтому сопротивление между электродами определяется параллельным соединением объемного сопротивления и поверхностных сопротивлений четырех граней. Тогда

$$R_v = \frac{r_v a}{a^2} = r_v a = \frac{10^{10}}{10^{-10}} = 10^{12} \text{ Ом};$$

$$R_{S1} = R_{S2} = R_{S3} = R_{S4} = \frac{r_s a}{a} = r_s = 10^{11} \text{ Ом};$$

$$R_{ИЗ} = \frac{R_v \cdot R_{S1}}{R_{S1} + 4R_v} = \frac{10^{12} \cdot 10^{11}}{10^{11} + 4 \cdot 10^{12}} = 2,44 \cdot 10^{10} \text{ Ом};$$

$$I = \frac{U_0}{R_{ИЗ}} = \frac{2 \cdot 10^3}{2,44 \cdot 10^{10}} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ А}.$$

Задача 4.6. Между плоскими электродами площадью $S = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ размещены соединенные последовательно две пластины из различных диэлектрических материалов. Один из них имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon_1 = 2$; удельную проводимость $g_1 = 10^{-6} \text{ См/м}$; толщину $h_1 = 1 \text{ см}$. Для другого: $\epsilon_2 = 3$; $g_2 = 10^{-10} \text{ См/м}$; $h_2 = 2 \text{ см}$. В момент времени $t = 0$ к электродам подключено постоянное напряжение $U = 5 \text{ кВ}$. Определить напряженность электрического поля в диэлектриках в моменты времени $t = 0$ и $t \rightarrow \infty$. Найти напряженность электрического поля в диэлектриках при $t \rightarrow \infty$, если к электродам приложено переменное напряжение $U = 20 \text{ В}$ частотой $f = 50 \text{ МГц}$.

Решение

При постоянном напряжении в момент времени $t = 0$ напряженность поля в обоих диэлектриках равна 0, так как поляризации еще не произошло.

При $t \rightarrow \infty$ распределение постоянного напряжения между пластинами диэлектриков определяется их активными сопротивлениями R_1 и R_2 :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2},$$

где

$$R_1 = \frac{h_1}{g_1 S} = \frac{10^{-2}}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{+7} \text{ Ом}; \quad R_2 = \frac{h_2}{g_2 S} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{10^{-10} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 10^{12} \text{ Ом}.$$

Отсюда следует, что $U_1 \ll U_2$. Так как $U = U_1 + U_2$, то напряженность электрического поля в диэлектриках равна

$$E_1 = \frac{U_1}{h_1} = 100 \text{ В/м};$$

$$E_2 = \frac{U_2}{h_2} = 9,9995 \cdot 10^5 \text{ В/м}.$$

На переменном напряжении при $t \rightarrow \infty$ распределение напряжения между диэлектриками определяется модулями полных сопротивлений слоев. Емкостные сопротивления слоев:

$$x_{c1} = \frac{h_1}{2p \cdot f \cdot \epsilon_0 \epsilon_1 \cdot S} = \frac{10^{-2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} \approx 9 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$x_{c2} = \frac{h_2}{2p \cdot f \cdot \epsilon_0 \epsilon_2 \cdot S} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} \approx 1,2 \cdot 10^4 \text{ Ом}.$$

Так как $x_{c1} \ll R_1$ и $x_{c2} \ll R_2$, то $U_1/U_2 = x_{c1}/x_{c2}$.

Отсюда $E_1 = 857 \text{ В/м}$; $E_2 = 571 \text{ В/м}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Сопротивление изоляции двухжильного кабеля длиной 2 м равно 300 МОм. Чему равно сопротивление изоляции такого же кабеля длиной 6 м?

Ответ: 100 МОм.

2. Цилиндрический стержень диаметром 10 мм и длиной 20 мм из диэлектрика с удельным объемным сопротивлением 10^{13} Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением 10^{14} Ом покрыт с торцов металлическими электродами. Чему равно сопротивление между электродами?

Ответ: $6,3 \cdot 10^{13}$ Ом.

3. Диэлектрик в форме прямоугольного параллелепипеда длиной $l = 5$ см и площадью поперечного сечения $b \times h = 2 \times 0,5$ см² с торцов покрыт металлическими электродами. При напряжении $U_0 = 1500$ В через диэлектрик проходит ток $I_0 = 10^{-9}$ А. Найти удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если удельное объемное сопротивление $r_v = 10^{10}$ Ом·м.

Ответ: $2,14 \cdot 10^{12}$ Ом.

4. На поверхности диэлектрика параллельно друг другу расположены два ножевых электрода. Расстояние между электродами $b = 2$ мм, их ширина $h = 10$ мм. Чему равно удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если сопротивление между электродами 5 МОм?

Ответ: 25 МОм.

5. Определить плотность вспененного полистирола (пенополистирола), имеющего диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{вс} = 1,5$. Какую долю объема материала Q_v занимает воздух? Вспениванию подвергся полистирол с параметрами $e = 2,6$, плотность $d = 1050$ кг/м³.

Ответ: $569,1$ кг/м³; 0,458.

6. Рассчитать величину потерь плоского конденсатора с диэлектриком из керамики, работающего на частоте 100 МГц при напряжении между обкладками 150 В, если площадь обкладок 1 мм², расстояние между ними 1 мм, $e = 25$, а значение $\operatorname{tg} d$ для керамики составляет $2 \cdot 10^{-3}$.

Ответ: $\approx 4,25$ Вт.

7. Композиционный диэлектрик состоит из полимера-связки с $e = 2,8$, наполнителя с $e = 8,2$ и стабилизатора с $e = 4,1$ в объемном соотношении 10:4:1. Определить удельную емкость платы толщиной 1,5 мм, выполненной из этого материала, и максимальное напряжение, которое можно приложить к металлическим электродам, расположенным на противоположных сторонах платы, если диэлектрическая прочность диэлектрика 300 кВ/см.

Ответ: ≈ 20 мкФ/м²; 45 кВ.

Технологические особенности типов производства

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Характер технологического процесса (ТП) во многом зависит от типа производства, определяющего построение и степень детализации разрабатываемых технологических процессов. Различают единичное, серийное (мелко-, средне- и крупносерийное) и массовое производства.

В условиях *единичного производства* на рабочих местах обрабатывают различные детали. Технологические операции при этом максимально концентрированы, выполняются квалифицированными рабочими с применением точного универсального оборудования.

При *серийном производстве* изделия выпускаются партиями. На рабочих местах выполняется несколько периодически повторяющихся операций. Характер построения ТП зависит от объема выпуска.

При *массовом производстве* на рабочем месте выполняется одна и та же операция. Используются высокопроизводительные специальные станки, автоматы, СТО и точные заготовки. ТП строятся по принципу непрерывного потока. Цикл изготовления – минимальный, себестоимость продукции – наименьшая по сравнению с другими типами производства.

Тип производства определяется коэффициентом закрепления операций

$$K_{з.о} = O / P,$$

где O – количество операций ТП, подлежащих выполнению в течение месяца; P – число рабочих мест, необходимых для их выполнения,

$$P = \frac{N \sum_{i=1}^k T_{шт.i}}{60 \cdot k \cdot \Phi_d}.$$

Здесь N – годовой объем выпуска; $\sum T_{шт.i}$ – трудоемкость изготовления изделия; $T_{шт.i}$ – норма штучного времени i -й операции; $\Phi_d = 2070$ ч – действительный годовой фонд рабочего времени.

В серийном производстве объем выпуска определяет темп выпуска:

$$t = 60 \Phi_d / N.$$

Целесообразно, чтобы длительность операций была равна или кратна t .

Для массового производства $K_{3,0} = 1$, для крупносерийного $1 < K_{3,0} \leq 10$, для серийного $10 < K_{3,0} \leq 20$, для мелкосерийного $20 < K_{3,0} \leq 40$, для единичного $K_{3,0} > 40$ и не регламентируется.

До разработки ТП реальное значение $K_{3,0}$ неизвестно. При определении типа производства учитывают либо заданную (плановую) трудоемкость, либо ориентировочную, оцененную на начальных стадиях проектирования ТП [1]. Тогда

$$K_{3,0} = O \cdot t / \sum T_{шт.i} = t / T_{шт.ср},$$

где $T_{шт.ср}$ – средняя норма штучного времени $T_{шт}$ определяющей операции данного ТП.

Примеры решения задач

Пример 1

Сборку изделия выполняют за 7 технологических операций, общая трудоемкость которых 9,88 мин. Объем выпуска изделий $N = 60\ 000$ шт. в год. Определить тип производства.

Решение

При односменной работе и коэффициенте выполнения нормы $k = 1$ необходимое число рабочих мест равно

$$P = \frac{N \cdot \sum T_{шт.i}}{60 \cdot k \cdot \Phi_d} = \frac{60000 \cdot 9,88}{60 \cdot 1 \cdot 2070} = 4,8 \approx 5.$$

При $K_{3,0} = O/P = 7/5 = 1,4$ производство крупносерийное.

Пример 2

Деталь изготавливают штамповкой за одну операцию. Норма штучного времени $T_{шт} = 0,2$ мин. Определить тип производства при объеме выпуска $N = 50\ 000$ шт. в год.

Решение

Такт выпуска деталей при односменной работе

$$t = 60\Phi_d / N = 60 \cdot 2070 / 50\ 000 = 2,5 \text{ мин.}$$

При $K_{3,0} = t/T_{шт} = 2,5/0,2 = 12,5$ – производство среднесерийное.

Пример 3

Колодка разъема изготавливается из термопласта АГ-4в. Объем выпуска $N = 60\ 000$ шт. в год. Максимальный линейный размер детали $l_{\max} = 12$ мм. Определить тип производства при односменной работе.

Решение

Наиболее экономичный способ изготовления изделий из АГ-4в – литьевое прессование в стационарных многогнездных пресс-формах без арматуры. Предположим, что используется 6-гнездная пресс-форма. Такт выпуска деталей определяется по формуле

$$t = 60\Phi_d / N = 60 \cdot 2070 / 60\ 000 = 2,07 \text{ мин.}$$

Норма штучного времени на операции прессования

$$T_{\text{шт}} = T_o + T_v + T_{\text{орг}} = T_o + T_v + k(T_o + T_v),$$

где T_o – основное технологическое время, равное выдержке материала в пресс-форме.

Из технологических справочников (см., например: Справочник конструктора-приборостроителя. Проектирование. Основные нормы / под ред. В. Л. Соломахо. – Минск : Выш. шк., 1988. – 272 с.) для термопласта АГ-4в берем выдержку 1 мин на 1 мм толщины детали. Так как $l_{\max} = 12$ мм, $T_o = 12$ мин, то на одну деталь при шести гнездах $T_o = 12 / 6 = 2$ мин;

T_v – вспомогательное время (загрузка загрузочной камеры пресс-материалом, включение и выключение давления, удаление детали, очистка пресс-формы, удаление литника и др.), а $T_{\text{орг}}$ – время организационного обслуживания рабочего места.

Из нормативно-технической документации следует, что

$$T_v = 0,592 \text{ мин}; T_{\text{орг}} = 7,5 \% (T_o + T_v) = 2,79 \text{ мин.}$$

При $K_{3,0} = t / T_{\text{шт}} = 2,07 / 2,79 \approx 1$ производство массовое.

Задачи для самостоятельного решения

Определить тип производства для вариантов технологических процессов, приведенных в табл. 5.1.

Таблица 5.1

| № варианта ТП | Объем выпуска, тыс. шт. в год | Трудоемкость изготовления, мин | Кол-во операций в ТП | Число смен | Кэф. выполнения нормы | $T_{\text{шт}}$, мин |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 30 | - | - | 1 | 1 | 0,3 |

Окончание табл. 5.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|------|------|-----|---|------|-----|
| 2 | 500 | 250 | 150 | 1 | 1 | - |
| 3 | 0,2 | - | - | 1 | 1 | 1,5 |
| 4 | 1500 | - | - | 1 | 0,95 | 2,0 |
| 5 | 12 | - | - | 1 | 0,95 | 0,5 |
| 6 | 1000 | 120 | 17 | 2 | 0,95 | - |
| 7 | 0,8 | 35 | 54 | 2 | 1,05 | - |
| 8 | 1,2 | 40 | 80 | 2 | 1,05 | - |
| 9 | 500 | 180 | 12 | 2 | 1 | - |
| 10 | 5 | 3000 | 14 | 2 | 0,95 | - |
| 11 | 1000 | 3600 | 22 | 3 | 1 | - |
| 12 | 5 | 3600 | 23 | 3 | 1 | - |

Действительный годовой фонд рабочего времени при односменной работе – 2070 ч, двухсменной – 4140 ч, трехсменной – 6210 ч.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

Составление плана обработки (технологического маршрута)

Необходимые теоретические сведения и расчётные формулы

Конструкция детали в значительной степени определяет структуру ТП. На построение ТП влияют форма, размеры и материал детали, требуемая точность размеров, качество поверхности, термообработка, вид заготовки, объем выпуска, реальные условия производства. В табл. 6.1 отражена связь этих характеристик с технологическими факторами [2, 6].

Таблица 6.1

Связь конструкторско-технологических характеристик детали с факторами ТП

| Характеристики детали | Факторы технологического процесса | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|------------|----------|--------------|----------------------------|----------------------|
| | Вид заготовительной операции | Виды обработки резанием | Последовательность операций | Концентрация операций | Термическая обработка | Вид окончательной обработки | Выбор технологических баз | Режимы обработки | Инструмент | Оснастка | Оборудование | Метод обеспечения точности | Квалификация рабочих |
| Материал | ++ | - | - | - | + | + | - | + | + | - | - | - | - |
| Сложность формы | ++ | + | + | + | - | - | + | - | + | + | + | - | - |
| Простановка размеров | - | - | + | + | - | - | ++ | - | - | + | - | + | - |
| Точность размеров | - | ++ | ++ | - | - | ++ | - | + | + | - | + | + | + |
| Точность формы | - | ++ | + | - | + | ++ | - | - | + | + | + | - | + |
| Взаиморасположение поверхностей | - | - | ++ | ++ | + | - | + | - | - | + | - | - | + |
| Шероховатость поверхности | - | - | - | - | - | ++ | - | + | + | - | - | - | + |
| Структура поверхностного слоя | + | - | + | - | + | + | - | + | + | - | - | - | + |
| Твердость | - | - | + | - | ++ | + | - | + | + | - | + | - | - |
| Покрытие | - | - | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - |
| Объем выпуска | ++ | + | + | ++ | - | - | - | - | + | + | + | + | + |

Примечания:

«+ +» – характеристика оказывает сильное влияние на параметр ТП;

«+» – влияние имеется; «-» – влияние отсутствует или слабое.

Вначале по чертежу детали определяем поверхности, которые нельзя получить на заготовке без последующей обработки. Обычно точность их размеров выше 12-11-го квалитетов, а шероховатость $R_z \leq 20$. Обработке могут подвергаться и менее точные поверхности, если их технологические свойства не удовлетворяют требованиям чертежа. При анализе конструкции особое внимание уделяется размерам, допускам формы и расположения поверхностей точных квалитетов, малых шероховатостей, особым свойствам детали.

Разработка ТП облегчается, если можно подобрать типовой или групповой ТП. Для этого необходимо разработать конструкторско-технологический код детали и ввести деталь в группу, для которой имеется унифицированный ТП [1]. В серийном и массовом производстве желательно использовать заготовочные операции получения точных заготовок, хотя для этого имеются и ограничения: сложность оборудования, пористость отливок, высокая стоимость и сложность пресс-форм и штампов и др.

Планирование начинают с выбора последней операции, обеспечивающей заданные чертежом детали точность и шероховатость. С учетом формы обрабатываемой поверхности с помощью справочных материалов назначают для нее вид окончательной обработки. Обычно имеется несколько равнозначных по технологическому критерию вариантов. Поэтому окончательный выбор метода производят с учетом возможности выполнения других требований чертежа и экономических критериев. Предпочтительной является операция, однотипная с предыдущей, поскольку это позволяет использовать те же станки, приспособления и инструменты.

Первыми обрабатываются базовые поверхности. Операции, на которых наиболее вероятно появление брака, следует выполнять в начале обработки. Отверстия, пазы, шлицы, фаски и т.п., если они не используются в качестве базовых, обрабатываются в конце ТП.

План операций обработки оформляется в виде таблицы (табл. 6.2):

Таблица 6.2

План операций обработки поверхностей детали

| № и вид поверхности | Наименование операции | Базовые поверхности | Операционный размер | Шероховатость поверхности | Оборудование, СТО, инструмент |
|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | | | | | |

Пример 1

Составить план обработки детали (движок) (рис. 6.1). Материал – алюминиевый сплав Д16Т, производство серийное.

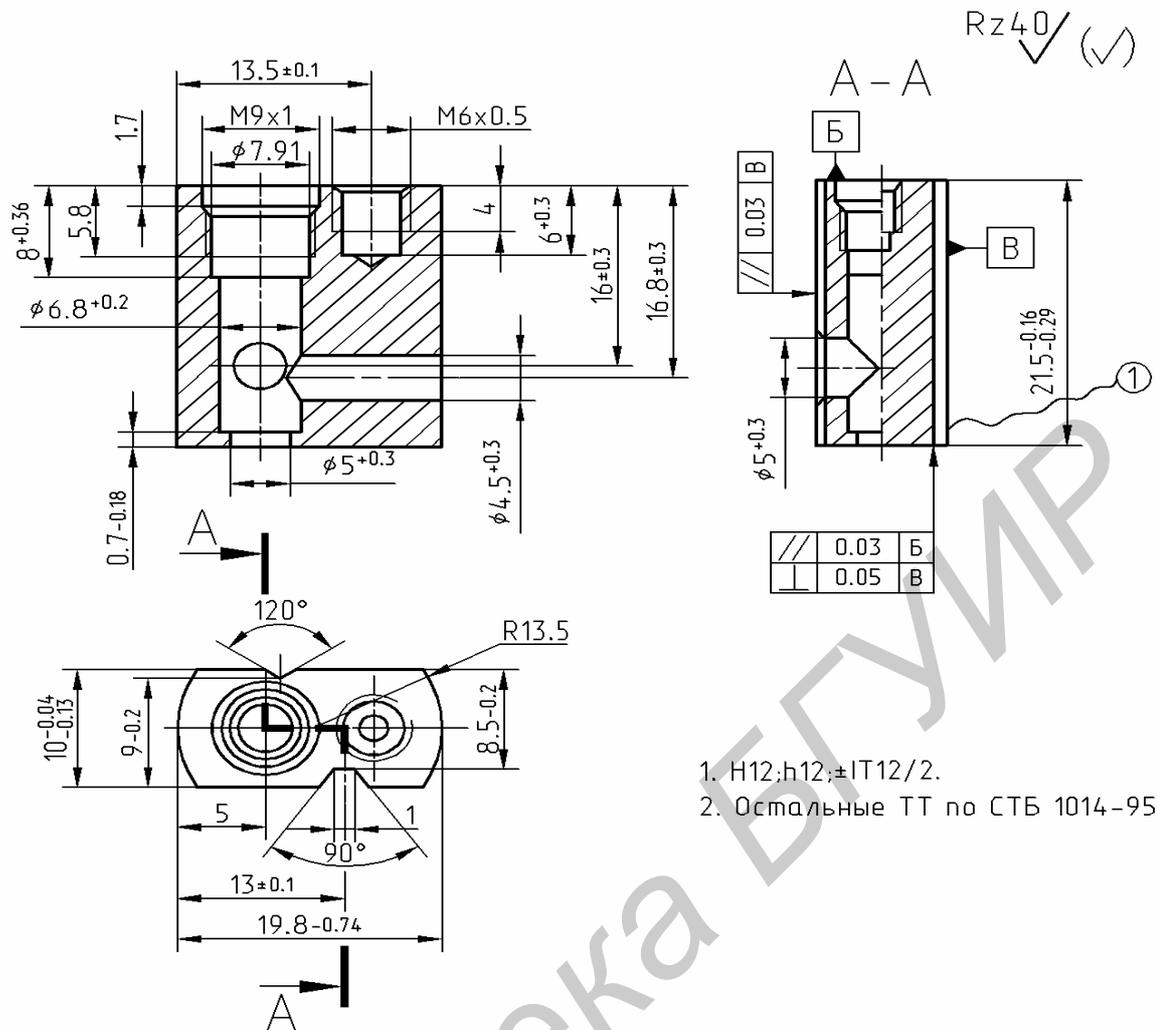


Рис. 6.1. Чертеж детали (двигжок) с техническими требованиями

Решение

1. Анализ технического задания

Двигжок представляет собой прямоугольную призму с двумя закругленными противоположными гранями. Деталь имеет 3 связанных отверстия с взаимно перпендикулярными осями. Одно из них – многоступенчатое с резьбовой ступенью. Имеется также глухое отверстие и два паза на плоских гранях. К точности размеров (11-й квалитет), отклонению формы и шероховатости поверхностей ($R_z 40$) высоких требований не предъявляется.

Материал детали (алюминиевый сплав D16T) технологичен к обработке давлением и резанием. Его сортамент достаточно широк.

2. Выбор метода получения заготовки

Для детали с указанными параметрами в серийном производстве в качестве заготовки целесообразно выбрать пруток, сечение которого соответствовало бы ее профилю. Из сортового прутка прямоугольного сечения штамповкой получают заготовку требуемого сечения для нескольких деталей.

Длину заготовки рассчитывают с учетом допустимого коэффициента вытяжки металла [3, 4]. Затем заготовку разрезают на части длиной, соответствующей длине детали с припусками под обработку. Обрабатывают наружный контур для обеспечения требуемого положения поверхностей, фрезеруют пазы и обрабатывают отверстия.

3. Технологический маршрут

1. Резка прутка из сортового проката сечением 10x20 мм на заготовки. В предположении, что из заготовки будет изготавливаться 5 деталей, и равенства объемов заготовок на данной операции и операции холодного выдавливания рассчитывается длина исходной заготовки:

$$l_{\text{пр}} \cdot S_{\text{пр}} = l_{\text{заг}} \cdot S_{\text{заг}},$$

где $l_{\text{пр}}$ и $S_{\text{пр}}$ – длина и площадь поперечного сечения исходного прутка; $l_{\text{заг}}$ и $S_{\text{заг}}$ – то же для групповой заготовки требуемого профиля.

$$l_{\text{заг}} = 5 \cdot l_{\text{дет}} + 5 \cdot Z_{\text{фр}} + 4 \cdot L_{\text{ф}},$$

где $l_{\text{дет}}$, $Z_{\text{фр}}$, $L_{\text{ф}}$ – длина детали, припуск под фрезерование торцов, ширина реза при разделении прутка на индивидуальные заготовки.

Из расчетов и справочных данных: $S_{\text{пр}} = 158 \text{ мм}^2$, $Z_{\text{фр}} = 0,5 \text{ мм}$, $L_{\text{ф}} = 2 \text{ мм}$, тогда $l_{\text{пр}} = 93 \text{ мм}$ (схема обработки показана на рис. 6.2, а).

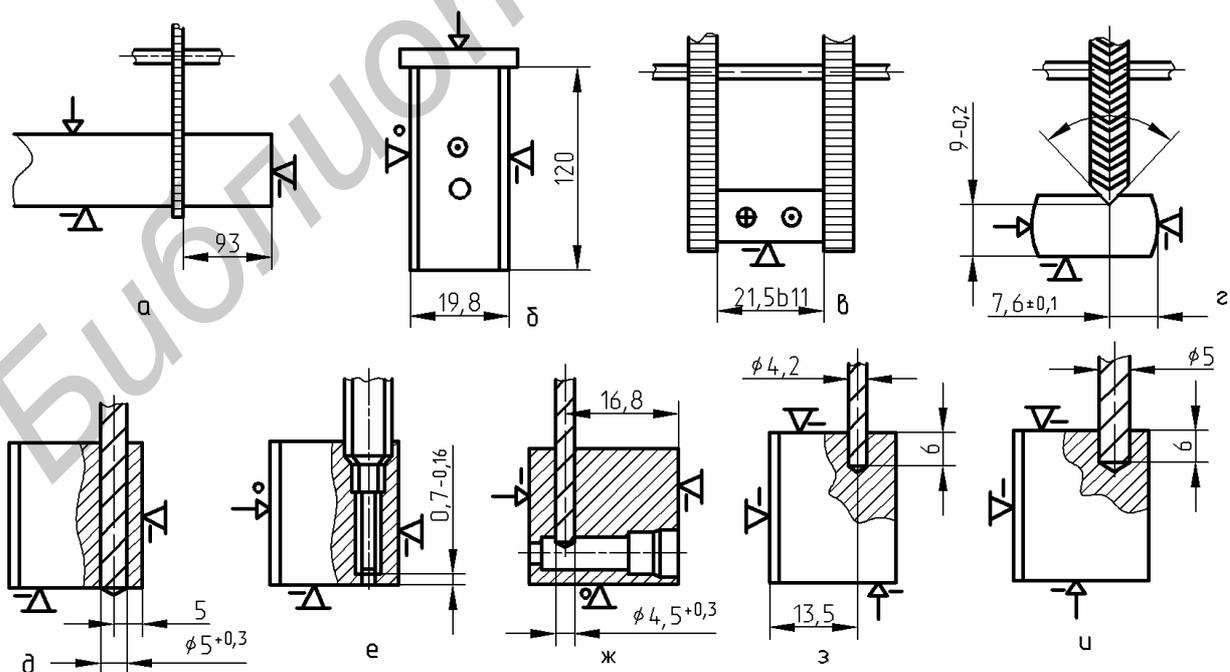


Рис. 6.2. Технологический маршрут

2. Сплав D16T поставляется в упрочненном состоянии, для повышения его технологичности к обработке давлением проводим термообработку прутка (рекристаллизационный отжиг на пластичность при температуре 250–280⁰С в течение 3–5 ч).

3. Холодное объемное выдавливание профиля детали длиной $l_{\text{заг}} = 120$ мм (рис. 6.2, б) по схеме прямого выдавливания пуансоном через отверстие требуемого сечения в матрице.

4. Резка профиля на 5 заготовок в размер $21,5 + Z_{\text{фр}}$ ($Z_{\text{фр}}$ – припуск под фрезерование торцов). Припуск может определяться как табличным методом, так и аналитическим расчетом (будет рассмотрен в следующих темах).

5. Фрезерование торцов дисковой фрезой в размер 21,5 в 11-й квалитет (рис. 6.2, в).

6. Фрезерование паза с углом 120° профильной дисковой фрезой (рис. 6.2, г).

7. Фрезерование паза с углом 90° (то же).

8. Сверление отверстия $\varnothing 5^{+0,3}$ мм (рис. 6.2, д).

9. Сверление отверстий $\varnothing 6,8$; $\varnothing 7,91$ и $\varnothing 9,0$ мм перовыми сверлами, которые обеспечивают необходимую их соосность (рис. 6.2, е).

10. Сверление отверстия $\varnothing 4,5^{+0,3}$ мм (рис. 6.2, ж).

11. Сверление отверстия $\varnothing 4,2$ мм глубиной 6 мм (рис. 6.2, з).

12. Зенкерование отверстия $\varnothing 4,2$ мм до $\varnothing 5,0^{+0,3}$ (рис. 6.2, и).

13. Нарезание резьбы М6 х 0,5 в три прохода на резьбонарезном станке РН-220 метчиками.

14. Нарезание резьбы М9 х 1 (то же).

При составлении плана обработки следует обратить внимание на требования к расположению поверхностей и выполнению размеров (высота и ширина детали). Ширина детали $10_{-0,13}^{-0,04}$ мм, требуемая параллельность торцов с пазами обеспечивается конструкцией штампа и расположением формообразующих поверхностей. Перпендикулярность торцов и размер $21,5_{-0,29}^{-0,16}$ мм – на операции фрезерования за счет ориентации заготовки относительно инструмента и точностью приспособления.

В план обработки необходимо включать контрольные операции, особенно наиболее точных размеров, взаимное положение поверхностей, несоосность отверстий, а также диаметров резьбы и соответствующих отверстий. Контрольные операции включаются в маршрут после выполнения соответствующих размеров или в конце ТП.

Пример 2

Для детали, представляющей собой корпус разъема, чертеж которого с техническими требованиями представлен на рис. 6.3, составить два варианта плана обработки с различными исходными заготовками (сортовой прокат 12-го качества точности и точная отливка, полученная по выплавляемым моделям) для одного и того же объема выпуска. Материал – силумин АЛ2. Провести сравнительный анализ вариантов по структуре ТП и необходимому оборудованию.

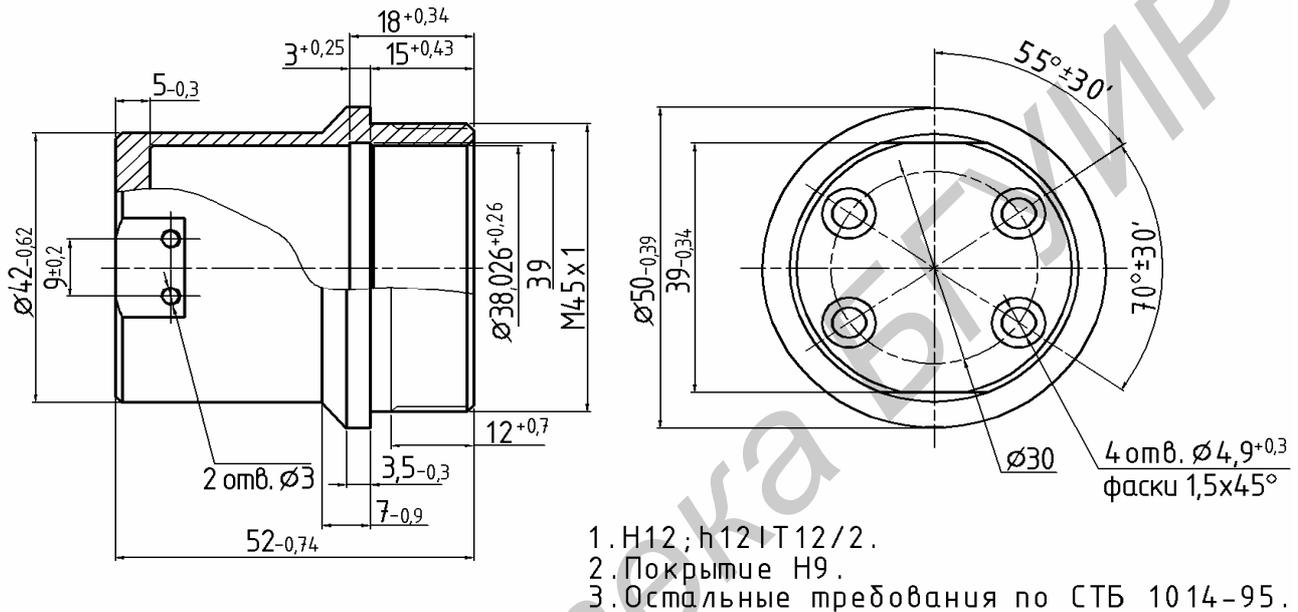


Рис. 6.3. Корпус разъема

Расчет припусков на обработку и промежуточных размеров в отливке корпусной детали

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Слой материала, который должен быть удален с заготовки в процессе обработки для получения детали, называется *общим припуском*. Он складывается из промежуточных припусков – слоев, снимаемых за операцию или переход.

Припуск всегда измеряется по нормали к обрабатываемой поверхности и задается в миллиметрах на сторону или диаметр.

Назначение рациональных общих и промежуточных (операционных) припусков имеет важное значение. Увеличенный припуск приводит к увеличению времени обработки и толщины снимаемой стружки, что вызывает соответствующее увеличение усиления обработки, деформации детали и уменьшение точности ее изготовления, растет износ инструмента, СТО и оборудования, расход электроэнергии и др. Заниженный припуск не позволяет удалять дефектный слой материала, получить требуемую точность и шероховатость обрабатываемых поверхностей.

При определении припуска необходимо учитывать конфигурацию и размеры заготовки, методы обработки, характеристики оборудования и его техническое состояние. Допускаемые отклонения величины припуска на обработку партии деталей определяются допуском на припуск или разностью между максимальным и минимальным припусками. Слишком малые допуски на припуск усложняют обработку, слишком большие увеличивают припуск на последние операции. Допуск на общий припуск является одновременно и допуском на заготовку.

Опытно-статистический метод определения припусков основан на использовании справочных данных. При этом не учитываются условия выполнения операции, и в большинстве случаев этот метод дает их завышенные значения. Достоинство метода – простота, поэтому он рекомендуется для единичного и мелкосерийного производства. Порядок назначения припусков по этому методу следующий:

- по справочникам находят припуски и допуски на каждую операцию;
- определяют межоперационные размеры и размеры заготовок. При этом учитывается метод получения заготовки и технологический маршрут;

- заполняется таблица соответствующей формы и при необходимости изображается графически поле припусков и допусков.

Расчет промежуточных размеров следует вести начиная с последнего перехода, т.е. исходя из размера детали.

Связь между исходными размерами заготовки ($D_{\text{заг}}$), операционными размерами (D_1 и D_2), припусками (Z), допусками (d) и размерами детали ($D_{\text{дет}}$) показана для случая 3-переходной обработки наружной и внутренней поверхностей на схеме расположения операционных припусков и допусков.

Припуски при массовом и крупносерийном производстве рассчитывают расчетно-аналитическим методом. Необходимая величина припуска на данном переходе или операции должна обеспечивать удаление погрешностей предыдущей, т.е. Z_{min} должно быть равно или больше геометрической суммы шероховатости R_Z^{i-1} , толщины деформированного слоя T_{i-1} , пространственных отклонений формы r_{i-1} и погрешностей установки e_y^{i-1} .

К пространственным отклонениям формы относятся: непараллельность поверхностей, несоосность отверстий, изогнутость, увод оси и др. Погрешность установки является геометрической суммой $e_6, e_{\text{пр}}, e_3$.

Следовательно, минимальный припуск: $\bar{Z}_{\text{min}} = \bar{R}_{z_{i-1}} + \bar{T}_{i-1} + \bar{r}_{i-1} + \bar{e}_{y_{i-1}}$.

В частности, для обработки внутренних и наружных поверхностей вращения и фасонных поверхностей

$$2Z_{\text{mini}} = 2(R_{z_{i-1}} + T_{i-1} + \sqrt{r_{i-1}^2 + e_{i-1}^2});$$

при последовательной обработке противоположащих поверхностей (односторонний припуск) имеем

$$Z_{\text{mini}} = R_{z_{i-1}} + T_{i-1} + r_{i-1} + e_{y_{i-1}}.$$

Величины составляющих R_z, T, r уменьшаются после каждой операции механической обработки и определяются по справочникам с учетом следующих соображений: при ТО качество поверхности улучшается, поэтому $T_{i-1} = 0$, как и при обработке литых чугуновых заготовок, начиная со второго перехода; суммарное значение пространственных отклонений формы рассчитывается следующим образом:

$$\rho_1 = 0,06\rho_0; \rho_2 = 0,05\rho_1 \text{ и } \rho_3 = 0,04\rho_2;$$

при установке в центрах $e_y = 0$;

при работе с одной установки на многопозиционных станках e_y второй позиции: $e_{y2} = 0,06 e_{y1} = 50$ мкм, для третьей и последующих позиций $e_y = 50$ мкм;

при обработке наружных поверхностей минимальный операционный припуск (см. схему припусков и допусков) равен $Z_{i-1}^{\min} = D_1^{\min} - D_{i-1}^{\max}$;

при обработке внутренних поверхностей: $Z_{i-1}^{\min} = D_{i-1}^{\min} - D_1^{\max}$;

максимальный припуск (для обоих случаев): $Z_{i-1}^{\max} = Z_{i-1}^{\min} + d_i + d_{i-1}$.

На чертеже детали указывается размер, относящийся лишь к последнему переходу, поэтому надо устанавливать промежуточные размеры для всех предшествующих переходов.

Для наружных размеров: $D_1^{\min} = D_{i-1}^{\max} - Z_i^{\min}$; $D_i^{\max} = D_1^{\min} + d_i$;

для внутренних: $D_1^{\max} = D_{i-1}^{\min} - Z_i^{\min}$; $D_i^{\min} = D_1^{\max} - d_i$.

Эти расчеты ведутся с последнего перехода (т.е. от размера детали) к первому – черновому переходу.

Порядок расчета припусков и предельных размеров по переходам следующий:

1. По таблицам определяются значения R_z , T , r , e и допуски d_i .
2. Рассчитывается Z^{\min} по всем технологическим переходам.
3. Определяются минимальные и максимальные промежуточные размеры.
4. Определяются минимальные и максимальные промежуточные предельные припуски Z^{\max} .
5. Определяются минимальные и максимальные общие припуски:

$$Z_0^{\min} = \sum Z_i^{\min}; Z_0^{\max} = \sum Z_i^{\max}.$$

6. Проверяется правильность произведенных расчетов по формулам

$$Z_i^{\max} - Z_i^{\min} = d_{i-1} - d_i; Z_0^{\max} - Z_0^{\min} = d_{\text{заг}} - d_{\text{дет}}.$$

Все данные рекомендуется заносить в таблицу следующей формы (все составляющие припуска измеряются в микрометрах):

| Переходы обработки отдельных поверхностей | R_z | T | ρ | δ_y | Z_i | D_i | δ_i | D_i | | Z_i | |
|---|-------|-----|--------|------------|-------|-------|------------|-------|-----|-------|-----|
| | | | | | | | | max | min | max | min |
| | | | | | | | | | | | |

Примеры решения задач

Расчетно-аналитическим методом рассчитать припуски на обработку и промежуточные предельные размеры для диаметра $52^{+0.06}$ мм отверстия 1 корпуса, показанного на рис. 7.1. На поверхностях 2, 3, 4 назначить припуски и допуски табличным методом по ГОСТ 1855-56. Заготовка представляет собой отливку 1-го класса точности. Масса отливки 2,5 кг.

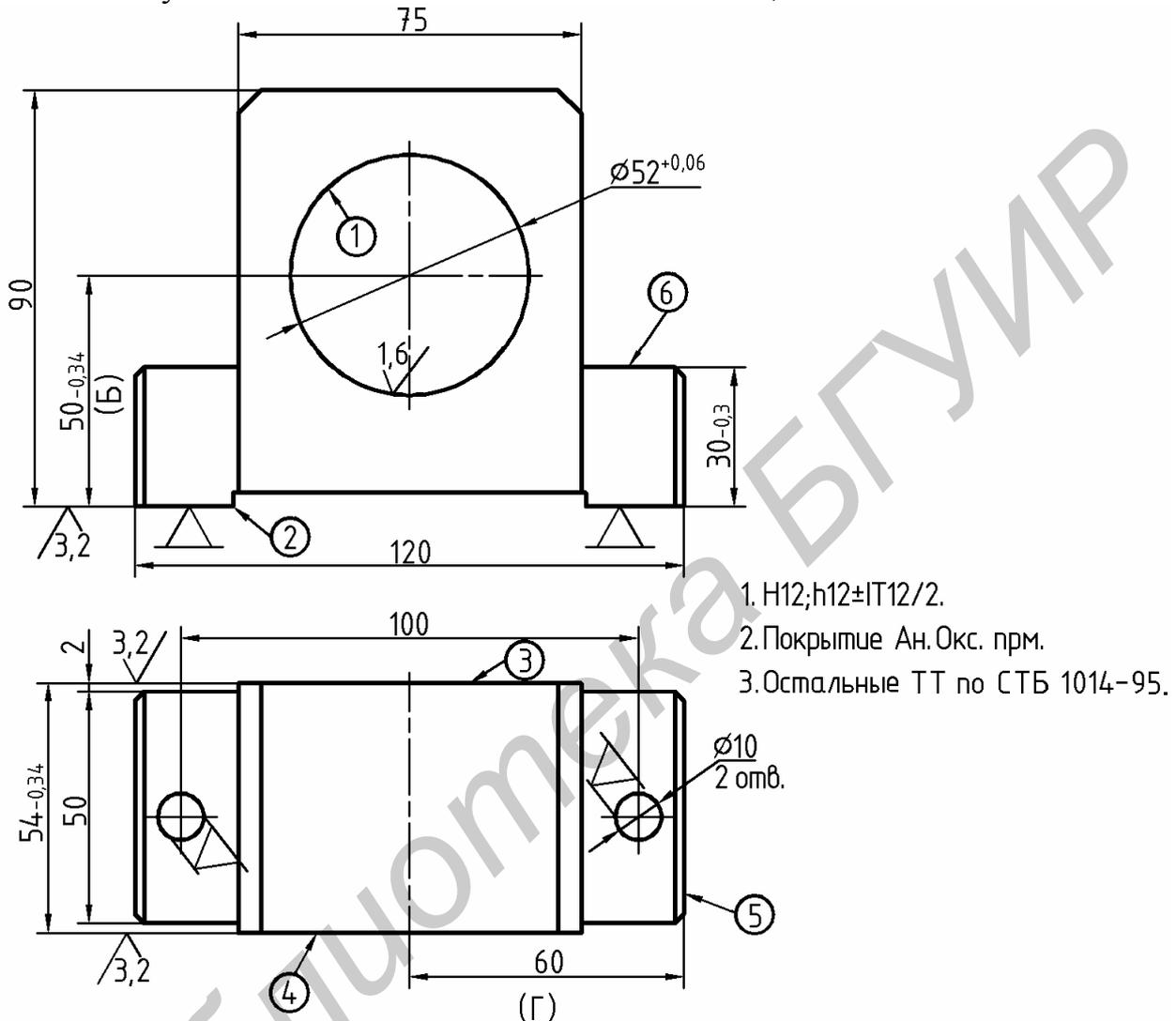


Рис. 7.1. Корпус подшипника: чертеж и схема установки при обработке отверстия $\varnothing 52^{+0.06}$ мм

Решение

Технологический маршрут обработки отверстия состоит из двух операций: чернового и чистового растачивания, выполняемых при одной установке обрабатываемой детали. Заготовка базируется на поверхности 2 и двух обработанных ранее отверстиях $\varnothing 10$ H6. Расчет припусков на обработку отверстия $\varnothing 52^{+0.06}$ мм ведется в форме табл. 7.1, в которую последовательно запи-

сывают технологический маршрут обработки отверстия, все значения элементов припуска и промежуточные размеры.

Суммарное значение R_z и h , характеризующее качество литых заготовок, составляет 600 мкм. После первого технологического перехода глубина нарушенного слоя h для деталей из чугуна исключается из расчетов, поэтому для чернового и чистового растачивания находят [6, табл.4.27] только значения R_z – соответственно 50 и 20 мкм и записывают их в расчетную таблицу. Суммарное пространственное отклонение для заготовки данного типа определяется по формуле

$$r_3 = \sqrt{r_{\text{кор}}^2 + r_{\text{см}}^2}.$$

Коробление отверстия следует учитывать как в диаметральном, так и в осевом его сечении. Поэтому

$$r_{\text{кор}} = \sqrt{(\Delta_K d)^2 + (\Delta_K l)^2} = \sqrt{(0,7 \cdot 52)^2 + (0,7 \cdot 54)^2} = 52 \text{ мкм},$$

где d , l – диаметр и длина обрабатываемого отверстия. Значения удельного коробления Δ_K для отливок находят по [6, табл.4.29].

При определении $r_{\text{см}}$ в данном случае следует принимать во внимание точность расположения базовых поверхностей, используемых в принятой схеме установки, относительно обрабатываемой в этой установке поверхности. Так, если бы для получения размера $50_{-0,34}$ мм при обработке поверхности 2 основания использовалось отверстие, последующая погрешность его расположения была бы равна допуску, который выдерживается при обработке поверхности 2 от отверстия, т.е. 0,34 мм. Если при обработке этой поверхности в качестве базы использовалась, как это бывает в большинстве случаев, какая-то наружная поверхность, следует учитывать смещение стержня в литейной форме, которым формируется отверстие, относительно наружной поверхности. Последнее принято определять как отклонение от номинального размера в отливке, равное половине допуска на размер по соответствующему классу точности.

Таким же образом определяется погрешность размера 60 мм в горизонтальной плоскости, т.е. смещение положения отверстия заготовки относительно наружной ее поверхности. В связи с тем что при обработке базовых отверстий $\varnothing 10H6$ в качестве направляющей базовой поверхности использовалась боковая поверхность 5 отливки, для определения погрешности расположения отверстия $\varnothing 52^{+0,06}$ мм относительно базовых отверстий следует

принять смещение стержня относительно поверхности 5 равным половине допуска на размер 60 мм (Г) по ГОСТ 1855-56.

Полное смещение отверстия в отливке относительно наружной ее поверхности представляет геометрическую сумму смещений в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$r_{\text{см}} = \sqrt{\left(\frac{d_{\text{Б}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_{\text{Г}}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{400}{2}\right)^2 + \left(\frac{600}{2}\right)^2} = 360 \text{ мкм},$$

где $d_{\text{Б}}$, $d_{\text{Г}}$ – допуски на размеры Б и Г по первому классу точности.

Суммарное пространственное отклонение заготовки равно

$$r_3 = \sqrt{360^2 + 52^2} = 363 \text{ мкм}.$$

Остаточное пространственное отклонение после чернового растачивания равно

$$r_1 = 0,05 r_3 = 0,05 \cdot 363 = 18 \text{ мкм}.$$

Погрешность установки при черновом растачивании равна

$$e_1 = \sqrt{e_6^2 + e_3^2} = 363 \text{ мкм}.$$

Погрешность базирования в рассматриваемом случае возникает за счет перекоса заготовки в горизонтальной плоскости при установке ее на штыри приспособления из-за наличия зазоров между отверстиями и штырями. Наибольший зазор равен

$$S_{\text{max}} = d_{\text{А}} + d_{\text{В}} + S_{\text{min}} = 0,016 + 0,014 + 0,013 = 0,043 \text{ мм},$$

где $d_{\text{А}}$ – допуск диаметра отверстия $\varnothing 10\text{H}6$ ($d_{\text{А}} = 0,016$ мм); $d_{\text{В}}$ – допуск диаметра штыря ($d_{\text{В}} = 0,014$ мм); S_{min} – минимальный зазор между штырем и отверстием ($S_{\text{min}} = 0,013$ мм).

Наибольший угол поворота заготовки на штырях можно определить из соотношения $\text{tg}\alpha = 0,043/100 = 0,00043$.

Погрешность базирования заготовки на длине обрабатываемого отверстия

$$e_6 = l \cdot \text{tg}\alpha = 50 \cdot 0,00043 = 0,021 \text{ мм} = 21 \text{ мкм}.$$

Погрешность закрепления заготовки e_3 [7, табл.5.21] принимаем 120 мкм. Тогда погрешность ее установки при черновом растачивании

$$e_1 = \sqrt{21^2 + 120^2} = 122 \text{ мкм}.$$

Остаточная погрешность установки заготовки при чистовом растачивании равна

$$e_2 = 0,05e_1 = 0,05 \cdot 122 = 6 \text{ мкм.}$$

Минимальное значение межоперационного припуска равно

$$2z_{\min} = 2 \left(Rz_{i-1} + h_{i-1} + \sqrt{r_{i-1}^2 + e_i^2} \right).$$

Минимальный припуск под растачивание:
черновое

$$2z_{\min} = 2 \left(600 + \sqrt{363^2 + 122^2} \right) = 2 \cdot 983 \text{ мкм;}$$

чистовое

$$2z_{\min} = 2 \left(50 + \sqrt{18^2 + 6^2} \right) = 2 \cdot 69 \text{ мкм.}$$

Результаты расчетов сводим в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Припуски и предельные размеры по технологическим переходам на обработку отверстия $\varnothing 52^{+0,06}$ мм в корпусе (см. рис. 7.1)

| Технологические переходы обработки | Элемент припуска, мкм | | | | $2z_{\min}$, мкм | Расчетный размер d_p , мм | Допуск d , мкм | Предельный размер, мм | | Предельное значение припуска, мм | |
|------------------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------|------------|----------------------------------|-------------|
| | R_z | h | r | e | | | | d_{\min} | D_{\max} | $2z_{\min}$ | $2z_{\max}$ |
| Литье | — | 600 | 363 | — | — | 49,956 | 600 | 49,36 | 49,96 | — | — |
| Растачивание черновое | 50 | — | 18 | 122 | 2·983 | 51,922 | 200 | 51,72 | 51,92 | 1,96 | 2,36 |
| Растачивание чистовое | — | — | — | 6 | 2·69 | 52,06 | 60 | 52,0 | 52,06 | 0,14 | 0,28 |

Графа «Расчетный размер» заполняется начиная с конечного, в данном случае чертежного размера, последовательным вычитанием расчетного минимального припуска на каждом технологическом переходе:

для чернового растачивания $d_{p1} = 52,06 - 0,138 = 51,922$ мм;

для литья $d_{p2} = 51,922 - 1,96 = 49,956$ мм.

Допуски на каждом переходе принимаются по [5, табл.П8], а также по качествам, приведенным в [8, т.2, табл.3.5], в соответствии с точностью обработки на рассматриваемом переходе:

для чистового растачивания – $d = 60$ мкм;

для чернового – $d = 200$ мкм;

для литья (отливка 1-го кл. точности по ГОСТ 1855-56) – $\delta = 600$ мкм.

В графе «Предельный размер» наибольшие значения d_{\max} получаются путем округления расчетных размеров до точности допуска на соответствующую

щем переходе, наименьшие d_{\min} – путем вычитания допусков из наибольших предельных размеров. Минимальные предельные значения припусков $2z_{\min}$ представляют собой разность наибольших предельных размеров на выполняемом и предшествующем переходах, а максимальные $2z_{\max}$ – соответственно разность наименьших предельных размеров.

Общие припуски $z_{o \min}$ и $z_{o \max}$ определяют, суммируя промежуточные, и записывают их значения под соответствующими графами:

$$z_{o \min} = 1,96 + 0,14 = 2,1 \text{ мм};$$

$$z_{o \max} = 2,36 + 0,28 = 2,64 \text{ мм}.$$

Рассчитывают общий номинальный припуск и номинальный диаметр заготовки:

$$z_{o \text{ ном}} = z_{o \min} + B_3 - B_{\text{Д}} = 2,1 + 0,3 - 0,06 = 2,34 \text{ мм};$$

$$d_{3 \text{ ном}} = z_{\text{Д ном}} - z_{o \text{ ном}} = 52 + 2,34 = 49,66 \text{ мм}.$$

Проверяют правильность выполнения расчетов:

$$2 \cdot z_{\max 2} - 2 \cdot z_{\min 2} = 0,28 - 0,14 = 0,14 \text{ мм};$$

$$\delta_1 - \delta_2 = 0,2 - 0,06 = 0,14 \text{ мм};$$

$$2 \cdot z_{\max 1} - 2 \cdot z_{\min 1} = 2,36 - 1,96 = 0,4 \text{ мм};$$

$$d_3 - d_1 = 0,6 - 0,2 = 0,4 \text{ мм}.$$

В завершение расчета строят схему расположения припусков и допусков на обработку отверстия $\varnothing 52^{+0,06}$ мм и промежуточных размеров (рис. 7.2).

На остальные обрабатываемые поверхности корпуса назначают припуски и допуски табличным методом по ГОСТ 1855-55. Расчетные и табличные значения припусков записывают в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Припуски и допуски на обрабатываемые поверхности корпуса (см. рис. 7.1)

| Поверхность | Размер, мм | Припуск, мм | | Допуск, мм |
|-------------|--------------------------|-------------|-----------|------------|
| | | табличный | расчетный | |
| 1 | $\varnothing 52_{-0,06}$ | 2·2,0 | 2·1,17 | $\pm 0,3$ |
| 2 | $30_{-0,3}$ | 2 | | $\pm 0,2$ |
| 3 | $54_{-0,34}$ | 2 | | $\pm 0,2$ |
| 4 | $54_{-0,34}$ | 2 | | $\pm 0,2$ |



Рис. 7.2. Схема расположения припусков и допусков на обработку отверстия корпуса подшипника

Расчет технической нормы времени

Необходимые теоретические сведения и расчётные формулы

Задачей нормирования является определение штучно-калькуляционного времени $T_{шт.-к}$. Для этого необходимо предварительно определить размер партии запускаемых в производство деталей. Определяем размер по упрощенной формуле, приведенной в [2]:

$$n = \frac{N \cdot a}{F},$$

где N – годовая программа выпуска; a – периодичность запуска, дней; F – число рабочих дней в году, $F = 253$.

$$n = \frac{50000 \cdot 3}{253} = 592 \text{ шт.}$$

Периодичность запуска возьмем равной 3 дням. Штучно-калькуляционное время определяется по формуле

$$T_{шт.-к} = T_{шт} + \frac{T_{п.з.}}{n}.$$

Пример решения задачи

Рассчитаем $T_{шт.-к}$ для операций токарной многоинструментальной обработки и фрезерования торцов.

Операция 010

Фрезерно-центровальный полуавтомат МР-76АМ.

Основное машинное время 0,072 мин.

Масса детали 2,248 кг, размеры $\varnothing 72 \times 198$.

Режущий инструмент – торцовая фреза (2 шт.) и центровочное сверло (2 шт.), измерительный – шаблон и штангенциркуль.

Стойкость фрезы 120 мин.

Решение

Расчет будем вести по нормативам [5].

Подсчитаем вспомогательное время, затраченное на следующие операции: взять деталь, установить и закрепить, открепить ее, снять и отложить.

$$T_{уст} = 0,032 + 0,013 + 0,030 + 0,030 + 0,013 + 0,026 = 0,114 \text{ мин};$$

включить станок кнопкой – $T_{упр} = 0,015 \text{ мин};$

промерить деталь шаблоном – $T'_{пз} = 0,013$ мин. Коэффициент периодичности промеров 0,3. Тогда

$$T_{пз} = 0,013 \cdot 0,3 = 0,039 \text{ мин} \approx 0,004 \text{ мин}.$$

Вспомогательное время равно

$$T_{в} = T_{уст} + T_{упр} + T_{пз} = 0,144 + 0,015 + 0,004 = 0,163 \text{ мин}.$$

Оперативное время

$$T_{оп} = T_{о} + T_{в} = 0,072 + 0,163 = 0,235 \text{ мин}.$$

Время на техническое обслуживание рабочего места равно

$$T_{тех} = T_{о} \frac{T_{см}}{T} = 0,235 \frac{4}{120} = 0,0078 \text{ мин},$$

где $T_{см} = 2 \cdot 2 = 4$ мин – время на смену двух фрез.

Время на организационное обслуживание рабочего места равно

$$T_{орг} = 0,235 \cdot 2,4/100 = 0,0056 \text{ мин}.$$

Время перерывов на отдых равно

$$T_{отд} = 0,235 \cdot 4/100 = 0,0094 \text{ мин}.$$

По нормативам, приведенным в [10], подготовительно-заключительное время составляет 9,5 мин.

Тогда

$$T_{шт.-к} = 0,072 + 0,163 + 0,0078 + 0,0056 + 0,0054 + \frac{9,5}{592} \cong 0,274 \text{ мин}.$$

Операция 020

Токарный полуавтомат 1713.

Основное машинное время 0,225 мин.

Масса детали 2,284 кг, размеры $\varnothing 72 \times 195$ мм.

Режущий элемент – резцы проходные (5 шт.) стойкостью $T_p = 133$ мин.

Измерительный инструмент – скоба (4 шт.).

Расчет ведем аналогично предыдущей операции.

Время на установку, закрепление, открепление, снятие и перенос детали:

$$T_{уст} = 0,032 + 0,015 + 0,034 + 0,034 + 0,015 + 0,030 = 0,16 \text{ мин}.$$

Время, необходимое для измерения скобой диаметра, равно

$$T_{изм} = 0,09 \cdot 0,3 \cdot 4 = 0,108 \text{ мин}.$$

Время для включения станка кнопкой равно

$$T_{уп} = 0,0015 \text{ мин.}$$

Определяем вспомогательное время:

$$T_{в} = 0,16 + 0,108 + 0,015 = 0,283 \text{ мин,}$$

оперативное:

$$T_{оп} = 0,225 + 0,283 = 0,508 \text{ мин.}$$

Время на техническое обслуживание рабочего места равно

$$T_{тех} = 0,225 \cdot 12,5/133 = 0,021 \text{ мин.}$$

$T_{сп} = 2,5 \cdot 5 = 12,5$ мин – время на смену пяти резцов.

Время на организационное обслуживание составляет 1,7 % от $T_{оп}$, т.е.

$$T_{орг} = 0,508 \cdot 1,7/100 = 0,0086 \text{ мин.}$$

Время на отдых составляет 6 % от $T_{оп}$:

$$T_{отд} = 0,508 \cdot 6/100 = 0,03 \text{ мин.}$$

По нормативам $T_{п-3}$ составляет 14,3 мин. Тогда

$$T_{шт.-к} = 0,225 + 0,283 + 0,021 + 0,0086 + 0,03 + \frac{14,3}{592} = 0,587 \text{ мин.}$$

Литература

1. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 648 с.
2. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники: учебник для вузов / В. В. Пасынков, В. О. Сорокин. – М. : Лань, 2005. – 368 с.
3. Антипов, Б. Л. Материалы электронной техники : задачи и вопросы / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. – М. : Лань, 2003. – 208 с.
4. Вейцман, Э. В. Технологическая подготовка производства РЭА / Э. В. Вейцман, В. Д. Венбрин. – М. : Радио и связь, 1989. – 128 с.
5. Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении: учеб. пособие / под ред. В. В. Бабука. – Минск : Выш. шк., 1987. – 255 с.
6. Машиностроение. Энциклопедия. Т.Ш-2. Технология заготовительных производств / под общ. ред. В. Ф. Мануйлова. – М. : Машиностроение, 1996. – 736 с.
7. Машиностроение. Энциклопедия. Т. Ш-3. Технология изготовления деталей машин / под ред. А. Г. Сулова. – М. : Машиностроение, 2000. – 840 с.
8. 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.
9. Технология обработки материалов : метод. пособие по курсовому проектированию. В 2 ч. Ч. 1 : Выбор инструмента и назначение режимов резания / Г. М. Шахлевич [и др.]. – Минск : БГУИР, 2001. – 47 с.
10. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Ч. 1. – М. : Машиностроение, 1984. – 416 с.
11. Общемашиностроительные нормативы вспомогательного времени и времени на обслуживание рабочего места, на работы, выполняемые на металлорежущих станках. – М. : Экономика, 1988. – 217 с.

Учебное издание

Шахлевич Григорий Михайлович
Телеш Евгений Владимирович

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Практикум

для студентов специальностей
«Экономика и управление на предприятии»,
«Маркетинг»
всех форм обучения

В 2-х частях

Часть 1

Материалы и технология
деталей изделий радиоэлектроники

Редактор Т. П. Андрейченко
Корректор Е. Н. Батурчик

| | | |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Подписано в печать 19.03.2008. | Формат 60×84 1/16. | Бумага офсетная. |
| Гарнитура «Таймс». | Печать ризографическая. | Усл. печ. л. 3,26. |
| Уч.-изд. л. 2,5. | Тираж 150 экз. | Заказ 191. |

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6