

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).

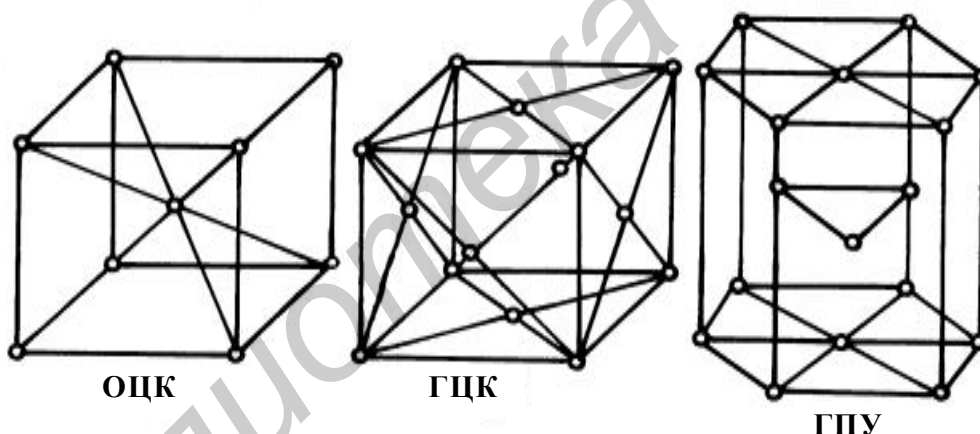


Рис. 1.1. Типы кристаллических решеток металлов и сплавов

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

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

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

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

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

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

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

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

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 $tg d$, которая входит в выражение для величины потерь в образце диэлектрика

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

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

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d},$$

где $U_{пр}$ – 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

$$R_v = \frac{r_v a}{a^2} = r_v a = \frac{10^{10}}{10^{-10}} = 10^{20} \text{ Ом};$$

$$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = \frac{r_s a}{a} = r_s = 10^{10} \text{ Ом};$$

$$R_{ИЗ} = \frac{R_v \cdot R_{s1}}{R_{s1} + 4R_v} = \frac{10^{20} \cdot 10^{10}}{10^{10} + 4 \cdot 10^{20}} = 2,44 \cdot 10^{10} \text{ Ом};$$

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

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	Коеф. 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.

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).

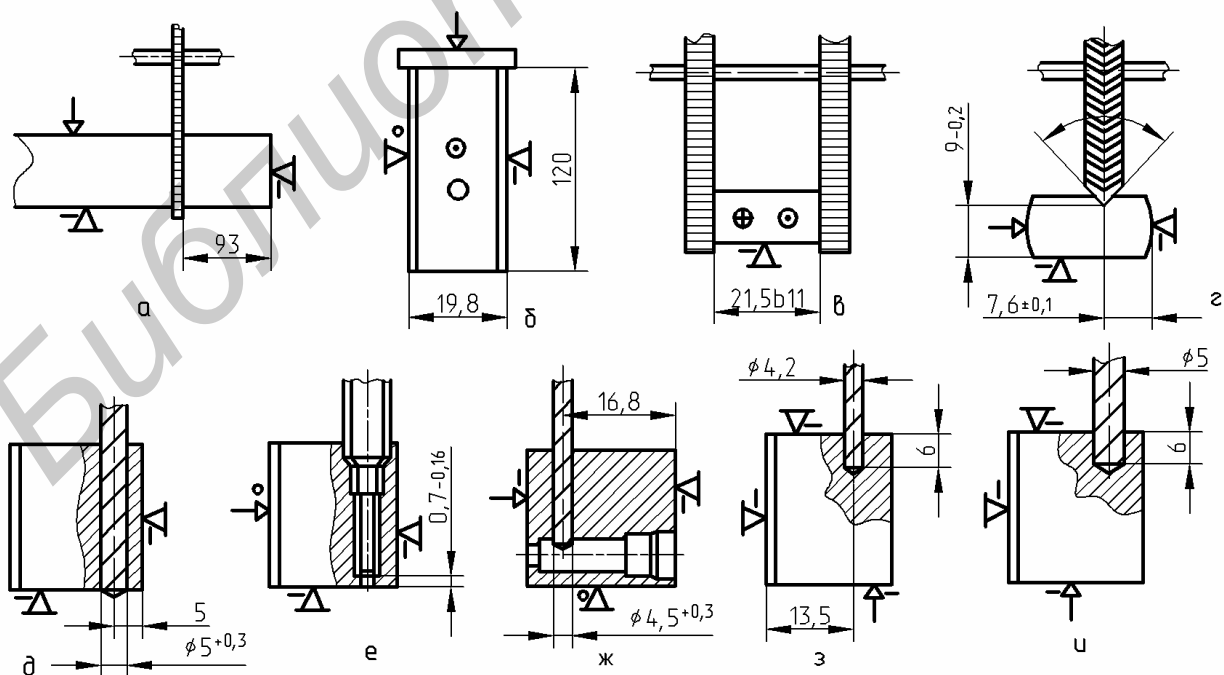


Рис. 6.2. Технологический маршрут

2. Сплав D16T поставляется в упрочненном состоянии, для повышения его технологичности к обработке давлением проводим термообработку прутка (рекристаллизационный отжиг на пластичность при температуре 250–280^oC 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^o профильной дисковой фрезой (рис. 6.2, г).

7. Фрезерование паза с углом 90^o (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 первыми 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.

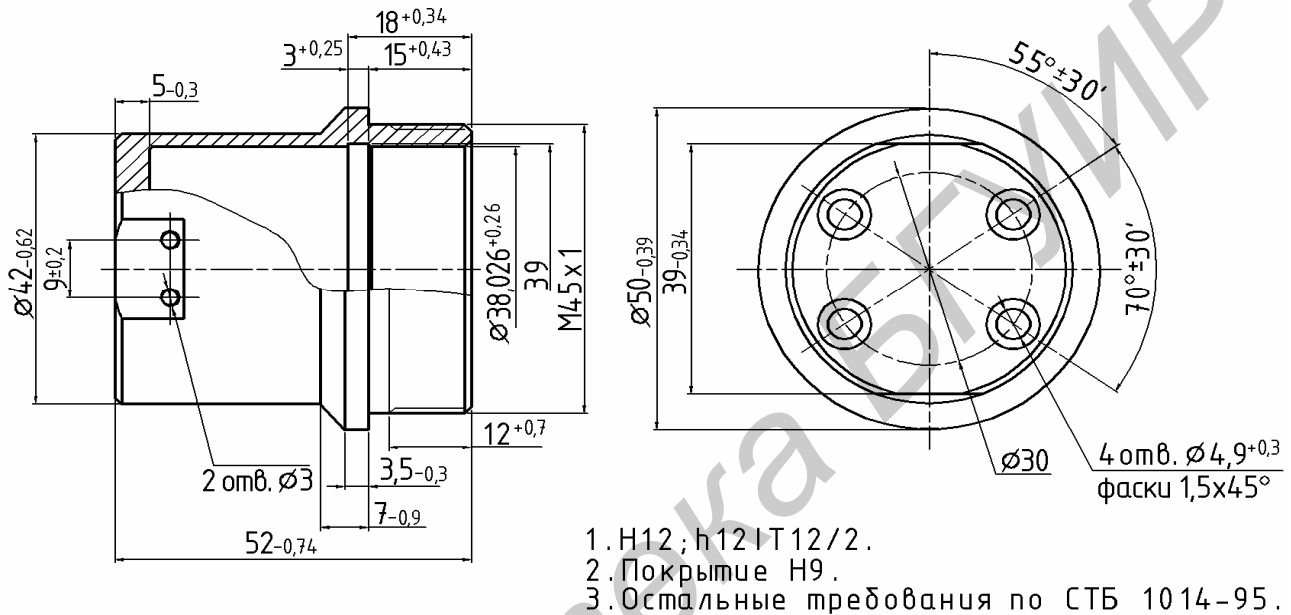


Рис. 6.3. Корпус разъема

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: $\bar{Z}_{\text{min}} = \bar{R}_{Zi-1} + \bar{T}_{i-1} + \bar{r}_{i-1} + \bar{e}_{yi-1}$.

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

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

при последовательной обработке противоположащих поверхностей (односторонний припуск) имеем

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

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 чугунных 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.

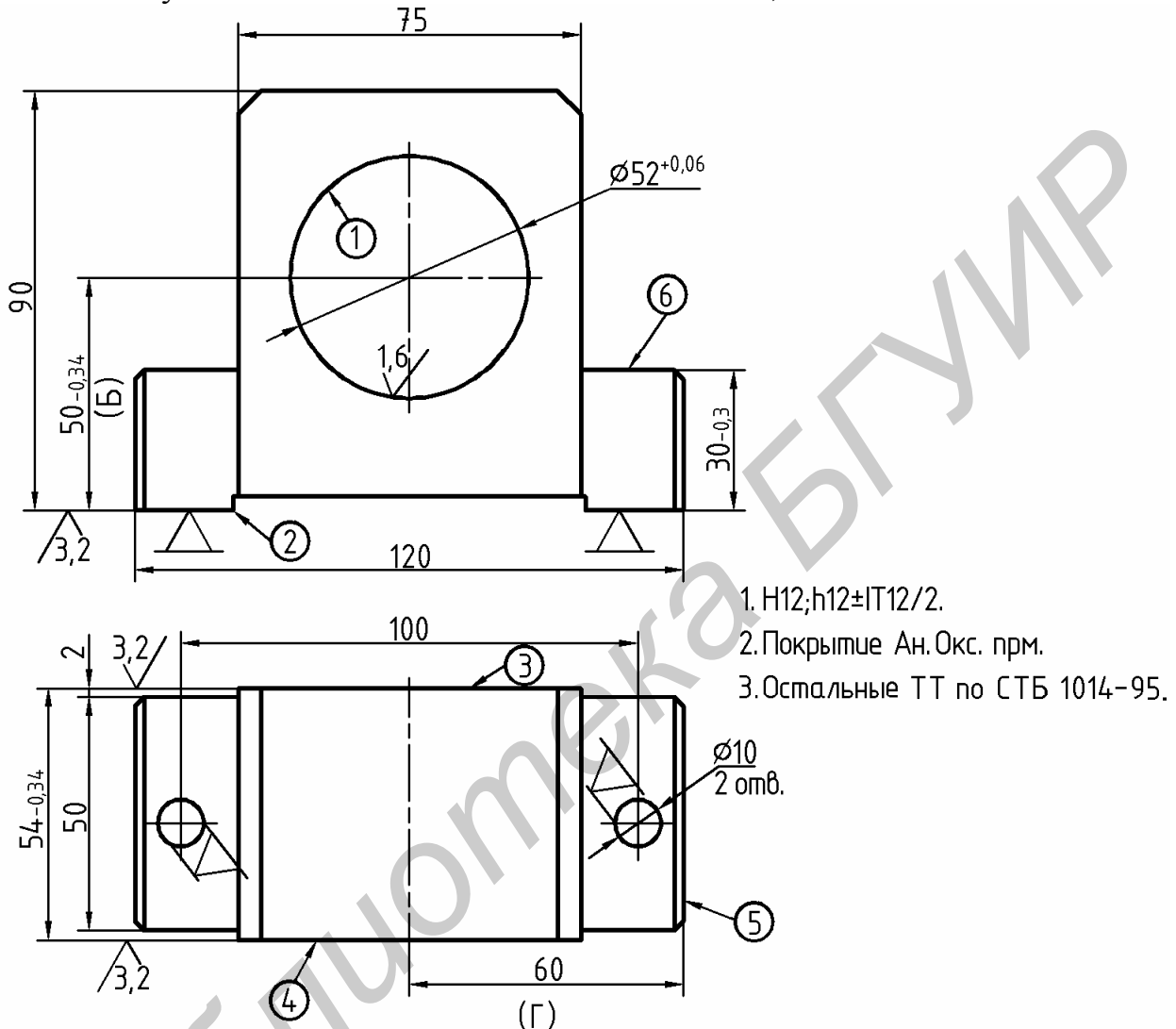


Рис. 7.1. Корпус подшипника: чертеж и схема установки при обработке отверстия $\varnothing 52^{+0.06}$ мм

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 черногового 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