



тольяттинский
государственный
университет

Л.А. Резников

ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Задачник

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

Л.А. Резников

ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Задачник

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

УДК 621.91.025(075.8)

ББК 34.63-56я73

Р 344

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент, начальник конструкторско-технологического отдела ООО «НПП «Авис» *Д.Е. Салабаев*;
канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» Тольяттинского государственного университета *А.А. Козлов*.

Р 344 Резников, Л.А. Теория резания материалов : задачник / Л.А. Резников. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2025. – 102 с. – ISBN 978-5-8259-1757-3.

Приведены элементы теории, задачи и задания по кинематике и динамике процесса резания материалов лезвийным инструментом и по формоизменению лезвийного инструмента в процессе резания. Даны примеры решения типовых задач.

Для самоконтроля студентов приведены алгоритмы решений всех задач сборника.

Предназначен для студентов направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

УДК 621.91.025(075.8)

ББК 34.63-56я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© Резников Л.А., 2025

ISBN 978-5-8259-1757-3

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2025

ВВЕДЕНИЕ

«Теория резания материалов» — одна из первых профилирующих дисциплин, изучаемых студентами направления 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Основные положения теории резания материалов используются при изучении последующих специальных дисциплин («Металлорежущие инструменты и инструментальная оснастка», «Технология машиностроения» и др.), а также при написании выпускной квалификационной работы.

В ходе преподавания этой дисциплины важно не только донести до обучающихся теоретические основы организации процесса резания материалов, но и научить их решать задачи, близкие к реальным конструкторским и технологическим задачам. Например, студент, как и технолог-производственник, должен уметь рассчитать сечение среза и динамическую неравномерность процесса резания при цилиндрическом фрезеровании или определить экономически целесообразный период стойкости отдельного режущего инструмента.

Достижению этой цели призвано помочь настоящее пособие, все задачи и задания которого являются оригинальными и по возможности приближены к реальным производственным задачам.

Каждая из трех глав основной части пособия построена следующим образом.

В первом пункте главы приводятся наименования, буквенные обозначения и размерности основных величин, используемых в данной главе. В дальнейшем тексте сборника эти величины дополнительно не расшифровываются.

Во втором пункте даются выдержки из теории резания материалов, относящиеся к тематике главы и сопровождаемые необходимыми таблицами и иллюстрациями. Приводятся основные формулы, которые содержат величины, упомянутые в первом разделе текущей главы и в предыдущих главах сборника.

В третьем пункте рассматриваются примеры решения типичных задач главы с подробным комментарием и числовыми оценками.

Четвертый пункт содержит пятьдесят задач по тематике данной главы, в которых возможно использование соотношений из предыдущих глав пособия, но гарантированно не используются соотношения из последующих глав.

Пятый пункт главы содержит комплексные задания, предназначенные для самостоятельного решения студентами. Каждое задание имеет 1000 вариантов исходных данных, что позволяет снизить вероятность тиражирования решений.

Глава 4 пособия предназначена для самоконтроля студентов. Она содержит формульные алгоритмы решений всех задач первой части (без комментариев).

Пособие содержит список литературы, предназначенной для самостоятельного изучения студентами, приложение 1, необходимое для решения ряда задач, и приложение 2, содержащее ответы на все задачи пособия.

Глава 1. КИНЕМАТИКА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ И СЕЧЕНИЕ СРЕЗА ПРИ РАБОТЕ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Обозначения

В рисунках, пояснительном тексте, задачах, заданиях и решениях главы 1 использованы обозначения, приведенные в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Обозначения и размерности некоторых величин

Наименование величины		Обозначение	Размерность
Толщина среза		a	мм
Ширина среза		b	
Диаметр	инструмента	D	
	обрабатываемой поверхности	D_o	
	обработанной поверхности	d	
Длина обработки		L	
Глубина резания		t	
Ширина фрезерования		B	
Частота вращения заготовки (инструмента)		n	об/мин
Подача на один оборот заготовки (инструмента)		s_o	мм/об
Число режущих лезвий (зубьев) инструмента		z	—
Угол подъема винтового зуба инструмента		ω	град
Угол в плане режущего лезвия	главный	j	
	вспомогательный	φ_1	

Элементы теории

Кинематика процесса резания изучает виды и количественные характеристики движений, присущих этому процессу.

Вне зависимости от вида процесса резания необходимо обеспечить перемещение режущих кромок инструмента относительно заготовки со скоростью главного движения v и скоростью подачи v_s .

Главное движение D_r может быть вращательным или поступательным и может придаваться заготовке или инструменту. Движение подачи D_s , также придаваемое инструменту или заготовке, может обеспечиваться кинематически или за счет особенностей конструкции многолезвийного инструмента.

При вращательном главном движении его скорость в некоторой точке M главной режущей кромки инструмента

$$v_M = \frac{\pi d_M n}{1000}, \text{ м/мин}, \quad (1.1)$$

где d_M — диаметр поверхности резания, проходящий через точку M , мм.

Под скоростью резания понимают наибольшую из скоростей v_M , достигаемых при данной схеме обработки.

При точении

$$v = \frac{\pi D_o n}{1000}, \text{ м/мин}, \quad (1.2)$$

а при фрезеровании и обработке отверстий осевым инструментом

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, \text{ м/мин}. \quad (1.3)$$

Скорость движения подачи при вращательном главном движении

$$v_s = n s_o, \text{ мм/мин}. \quad (1.4)$$

При работе многолезвийным инструментом подача на одно режущее лезвие (подача на зуб)

$$s_z = \frac{s_o}{z}, \text{ мм/зуб}. \quad (1.5)$$

Суммарное сечение срезаемого слоя (сечение среза), который снимается за один оборот заготовки или инструмента при точении (рис. 1.1, а) и обработке отверстий осевым инструментом:

$$f = s_o t = ab, \text{ мм}^2, \quad (1.6)$$

где

$$a = s_o \sin \varphi, \text{ мм}; \quad (1.7)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм}. \quad (1.8)$$

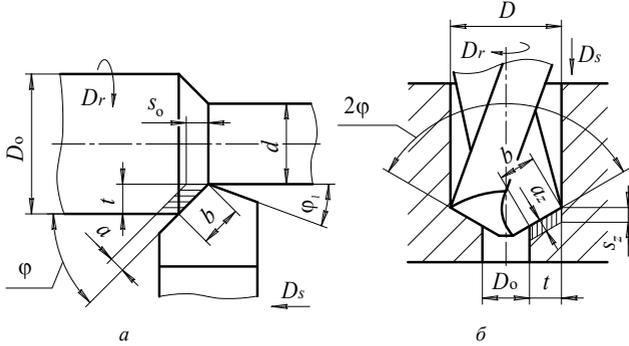


Рис. 1.1. Схемы процесса резания:
a – при продольном точении; *б* – при рассверливании

На один зуб многолезвийного осевого инструмента (рис. 1.1, *б*) приходится срез толщиной

$$a_z = s_z \sin \varphi, \text{ мм} \quad (1.9)$$

и сечение среза

$$f_z = s_z t = a_z b, \text{ мм}^2. \quad (1.10)$$

При цилиндрическом фрезеровании сечение среза переменного времени и зависит от количества режущих лезвий, одновременно участвующих в работе:

$$q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D} + 1} \right]. \quad (1.11)$$

Мгновенная толщина среза, приходящаяся на отдельный зуб цилиндрической фрезы:

$$a_{zi} = s_m \sin \mu_i, \text{ мм}, \quad (1.12)$$

где μ_i – текущий угол поворота *i*-го зуба фрезы, отсчитываемый от точки входа зуба в обрабатываемый материал (рис. 1.2).

На практике условие равномерности используют при проектировании операций фрезерования, подбирая целочисленные значения k и m_3 (m_3 – количество одновременно обрабатываемых заготовок) таким образом, чтобы

$$\left. \begin{aligned} kt_{oc} &\approx m_3 H; \\ kt_{oc} &< B_{\phi}, \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

где H – ширина заготовки, мм; B_{ϕ} – ширина фрезы, мм.

Производительность процесса резания определяется объемом среза, снимаемым в единицу времени, и при точении и обработке отверстий осевым инструментом описывается выражением

$$\Pi = ts_0 v, \text{ см}^3/\text{мин}, \quad (1.20)$$

а при цилиндрическом фрезеровании выражением

$$\Pi = ts_0 v \frac{B}{\pi D}, \text{ см}^3/\text{мин}. \quad (1.21)$$

Машинное время обработки

$$\tau_m = \frac{L + y_1 + y_2}{v_s}, \text{ мин}, \quad (1.22)$$

где y_1 и y_2 – величины врезания и перебега (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Теоретические значения врезания и перебега при обработке резанием

Вид обработки резанием	Врезание y_1 , мм	Перебег y_2 , мм
Точение «напроход», полная подрезка торца	$t \operatorname{ctg} \varphi$	$t \operatorname{ctg} \varphi_1$
Другие виды точения, сверление, зенкерование, развертывание		0
Фрезерование цилиндрическое	$\sqrt{Dt - t^2}$	

Примеры решения задач

Задача 1а. Заготовку диаметром 60 мм обтачивают резцом с круглой пластиной, диаметр которой 16 мм. Производительность процесса резания $75,4 \text{ см}^3/\text{мин}$, а скорость подачи резца $100 \text{ мм}/\text{мин}$.

Какой наибольший главный угол в плане возникает на режущей кромке инструмента при выполнении этой операции?

Решение

Наибольший главный угол в плане φ_{\max} возникает в той точке режущей кромки, которая обрабатывает наружный диаметр заготовки (рис. 1.3).

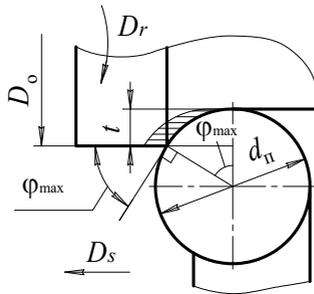


Рис. 1.3. К задаче 1а

Из геометрических соображений

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{0,5d_n - t}{0,5d_n} = 1 - \frac{2t}{d_n}. \quad (1.23)$$

Как видно из (1.23), для вычисления φ_{\max} необходимо знать глубину резания t .

Из всех исходных данных, приведенных в задаче, величина t входит только в производительность процесса резания.

Из формулы (1.20) находим, что

$$t = \frac{\Pi}{s_0 v}, \text{ мм.} \quad (1.24)$$

С учетом (1.2) выражение (1.24) принимает вид

$$t = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{\Pi}{D_0 n s_0}, \text{ мм,}$$

а с учетом (1.4)

$$t = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{\Pi}{v_s D_o}, \text{ мм.} \quad (1.25)$$

Подставляя (1.25) в (1.23), окончательно получаем

$$\varphi_{\max} = \arccos \left(1 - \frac{2000}{\pi} \cdot \frac{\Pi}{v_s D_o d_{\Pi}} \right), \text{ град.} \quad (1.26)$$

Расчет по формуле (1.26) показывает, что $\varphi_{\max} = 60^\circ$.

Задача 16. Цилиндрическая фреза, окружной шаг зубьев которой 15 мм, работает с глубиной резания 10 мм.

При каком наибольшем диаметре фрезы в работе будет одновременно находиться два ее зуба?

Решение

Если в работе одновременно находится два зуба фрезы, значит, $q \in [2; 3)$. Тогда в соответствии с (1.11)

$$2 \leq \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 < 3,$$

откуда

$$\pi \sqrt{\frac{D}{t}} \leq z < 2\pi \sqrt{\frac{D}{t}}. \quad (1.27)$$

Выразив из (1.17) число зубьев

$$z = \frac{\pi D}{t_{\text{окр}}} \quad (1.28)$$

и подставив в неравенство (1.27), после элементарных преобразований имеем:

$$\frac{t_{\text{окр}}^2}{t} \leq D < \frac{4t_{\text{окр}}^2}{t}. \quad (1.29)$$

Поскольку по условиям задачи необходимо найти наибольший диаметр фрезы, ограничимся правой частью двойного неравенства (1.29). Подставив в нее исходные данные, получаем условие $D < 90$ мм.

Проверкой с помощью выражения (1.28) обнаруживаем, что при $D = 90$ и $t = 15$ фреза не имеет целого числа зубьев ($z = 18,85$), а это недопустимо.

Взяв ближайшее целое число зубьев $z = 18$ (но не $z = 19$, так как в этом случае будет нарушено условие $D < 90$), пересчитываем диаметр фрезы при помощи еще одной модификации формулы (1.17)

$$D = \frac{zt_{\text{окр}}}{\pi}, \text{ мм}$$

и приходим к результату: $D = 86$ мм.

Задача 1в. В сплошном материале сверлят отверстие глубиной 126 мм со скоростью резания 42,4 м/мин и скоростью подачи 90 мм/мин.

Каково машинное время операции, если угол заборного конуса сверла 118° , а суммарное сечение среза при сверлении составляет 3 мм²?

Решение

Машинное время при сверлении, в соответствии с выражением (1.22) и табл. 1.2:

$$\tau_{\text{м}} = \frac{L + t \text{ctg} \varphi}{v_s}, \text{ мин.} \quad (1.30)$$

В зависимости (1.30) нам известны величины v_s , L и $\varphi = 59^\circ$, но не известна глубина резания, которая при сверлении отверстия в сплошном материале равна $t = D/2$.

Найдем диаметр сверла по заданным в условии задачи сечению среза, скорости резания и скорости подачи.

Из формулы (1.6) можем получить, что

$$s_o = \frac{f}{t} = \frac{2f}{D}, \text{ мм/об,} \quad (1.31)$$

а из формулы (1.4) с учетом (1.31), что

$$n = \frac{v_s}{s_o} = \frac{v_s D}{2f}, \text{ об/мин.}$$

Подставив полученное значение частоты вращения сверла в формулу (1.3), имеем

$$v = \frac{\pi}{2000} \cdot \frac{v_s}{f} D^2, \text{ м/мин,}$$

откуда

$$D = 10 \sqrt{\frac{20}{\pi} \cdot \frac{v}{v_s} f}, \text{ мм.} \quad (1.32)$$

Вычислив с помощью (1.32) глубину резания t и подставив ее в (1.30), приходим к выражению

$$\tau_m = \frac{1}{v_s} \left(L + 5 \operatorname{ctg} \sqrt{\frac{20}{\pi} \cdot \frac{v}{v_s} f} \right),$$

с помощью которого находим, что $\tau_m = 1,5$ мин.

Задачи

1.01. Проходной токарный резец работает с подачей 0,6 мм/об и снимает срез сечением 2 мм².

Чему равен главный угол в плане резца, если ширина среза при точении составляет 5 мм?

1.02. Проходной токарный резец оснащен пятигранной пластиной из твердого сплава и работает с подачей 1 мм/об. Сечение среза при точении составляет 2,3 мм², а ширина среза 3 мм.

Какой вспомогательный угол в плане имеет резец?

1.03. При продольном точении цилиндрической заготовки диаметром 63 мм ширина среза составляет 11 мм, а толщина среза 0,36 мм.

Какова скорость подачи резца, если его главный угол в плане 55°, а скорость главного движения у вершины инструмента 55 м/мин?

1.04. При продольном точении цилиндрической заготовки диаметром 60 мм производительность процесса резания составляет 113,1 см³/мин.

Какова скорость подачи инструмента, если скорость главного движения у вершины резца на 10 % меньше, чем скорость резания?

1.05. Разверткой, имеющей 12 зубьев, обрабатывают отверстие диаметром 25 мм с подачей 0,05 мм/зуб и скоростью резания 36 м/мин.

Какова скорость подачи инструмента?

1.06. Трехзубый зенкер диаметром 24 мм работает с подачей 0,12 мм/зуб.

Какова скорость подачи инструмента, если скорость резания при зенкеровании составляет 40 м/мин?

1.07. Скорость резания при зенкеровании отверстия диаметром 40 мм составляет 37 м/мин, а скорость подачи 204 мм/мин. Зенкер имеет 4 зуба и угол заборного конуса 120° .

Какая толщина среза приходится на каждый зуб зенкера?

1.08. При зенкеровании отверстия диаметром 24 мм скорость резания составляет 40 м/мин, а скорость подачи инструмента 225 мм/мин.

Сколько зубьев имеет зенкер, если толщина среза, приходящаяся на один его зуб, равна 0,1 мм, а угол заборного конуса зенкера 90° ?

1.09. Скорость резания при сверлении отверстия диаметром 12 мм равна 23 м/мин, а скорость подачи 305 мм/мин.

Какое сечение среза приходится на каждую кромку сверла?

1.10. При сверлении отверстия диаметром 16 мм суммарное сечение среза составляет $2,4 \text{ мм}^2$, а скорость подачи сверла 191 мм/мин.

Какова скорость резания на этой операции?

1.11. При сверлении отверстия диаметром 20 мм на каждую из режущих кромок сверла приходится срез толщиной 0,2 мм.

Какова скорость резания на этой операции, если скорость подачи инструмента 294 мм/мин, а угол заборного конуса сверла 120° ?

1.12. При рассверливании отверстия диаметром 6 мм до диаметра 18 мм на каждую из режущих кромок сверла приходится срез толщиной 0,14 мм и шириной 7 мм.

Какова скорость подачи сверла, если скорость резания 36 м/мин?

1.13. Производительность процесса резания при сверлении $71 \text{ см}^3/\text{мин}$, а скорость подачи инструмента 113 мм/мин.

Чему равен диаметр сверла?

1.14. Цилиндрическая фреза диаметром 106 мм имеет 10 зубьев и работает со скоростью резания 33,3 м/мин.

Какова скорость подачи фрезы, если ее подача на зуб составляет 0,2 мм?

1.15. Цилиндрическая фреза с двенадцатью винтовыми зубьями, угол подъема которых 31° , вращается с частотой 250 об/мин.

Какова скорость резания при работе этой фрезой, если осевой шаг ее зубьев 25 мм?

1.16. Цилиндрическая фреза, окружной шаг которой 16 мм, работает со скоростью резания 40 м/мин и подачей 0,1 мм/зуб.

Какова скорость подачи фрезы?

1.17. Производительность процесса резания при цилиндрическом фрезеровании составляет $63 \text{ см}^3/\text{мин}$, скорость подачи инструмента 120 мм/мин, а ширина фрезерования 75 мм.

Какова глубина резания на этой операции?

1.18. Скорость подачи цилиндрической фрезы 136 м/мин, ширина фрезерования 100 мм, а угол контакта инструмента с заготовкой 27° .

Чему равен диаметр фрезы, если производительность процесса резания при ее работе составляет $68 \text{ см}^3/\text{мин}$?

1.19. Глубина резания при обработке заготовки цилиндрической фрезой диаметром 102 мм составляет 7 мм, скорость резания 34 м/мин, а наибольшая толщина среза на отдельном зубе 0,11 мм.

Какова скорость подачи фрезы, если угол между ее зубьями 30° ?

1.20. Цилиндрическая фреза, имеющая 20 зубьев, работает с глубиной резания 8 мм и частотой вращения 120 об/мин.

Сколько зубьев фрезы работают одновременно, если скорость резания на этой операции 35 м/мин?

1.21. В каком интервале должно находиться число зубьев цилиндрической фрезы диаметром 80 мм, чтобы при фрезеровании с глубиной резания 5 мм в работе находилось одновременно два зуба?

1.22. Какое максимальное суммарное сечение среза будет сниматься в условиях задачи 1.21, если ширина фрезерования составляет 50 мм, подача инструмента 0,4 мм/зуб, а фреза имеет прямые зубья?

1.23. Цилиндрическая прямозубая фреза диаметром 100 мм имеет 20 зубьев и работает с глубиной резания 4 мм и подачей 0,2 мм/зуб при ширине фрезерования 21 мм.

Какое суммарное сечение среза снимает фреза в момент времени, когда ее очередной зуб выходит из контакта с заготовкой?

1.24. Цилиндрическая прямозубая фреза диаметром 82 мм, имеющая 15 зубьев, обрабатывает заготовку шириной 40 мм при скорости резания 40 м/мин, скорости подачи фрезы 317 мм/мин и глубине резания 10 мм.

Каково наибольшее суммарное сечение среза на этой операции?

1.25. Какое суммарное сечение среза снимается в условиях задачи 1.24 в момент времени, когда очередной зуб фрезы входит в контакт с заготовкой?

1.26. Цилиндрическая фреза диаметром 100 мм и шириной 160 мм имеет двенадцать винтовых зубьев с углом подъема 30° .

Сколько заготовок шириной 30 мм надо обрабатывать одновременно, чтобы фрезерование было равномерным?

1.27. Угол контакта цилиндрической фрезы с заготовкой составляет 32° , угол подъема винтовых зубьев 22° , а угол между зубьями 18° .

Какое минимальное число заготовок шириной 16 мм надо фрезеровать одновременно, чтобы при глубине резания 4 мм процесс было равномерным?

1.28. Обработка одной заготовки обеспечивает постоянство среза при работе цилиндрической фрезы диаметром 120 мм с винтовыми зубьями.

Какое минимальное количество заготовок следует собрать в комплект, чтобы сохранить равномерность фрезерования при замене инструмента на фрезу с таким же числом зубьев и углом их подъема, но диаметром 90 мм?

1.29. Цилиндрическая фреза диаметром 120 мм имеет 10 винтовых зубьев, которые обеспечивают равномерность фрезерования при одновременной обработке четырех заготовок шириной 58 мм.

Чему равен угол подъема зубьев, если известно, что он находится в диапазоне от 15 до 25°?

1.30. Какое суммарное мгновенное сечение среза снимает фреза в условиях задачи 1.29, если она работает со скоростью резания 42 м/мин при скорости подачи 172 мм/мин и глубине резания 8 мм?

1.31. Цилиндрическую заготовку длиной 290 мм обтачивают «напроход» резцом с квадратной сменной пластиной. Главный угол резца в плане 60°, толщина среза 1,3 мм, частота вращения заготовки 200 об/мин.

Каково машинное время операции, если сечение среза при точении составляет 6,5 мм²?

1.32. Цилиндрическую заготовку длиной 140 мм обтачивают «напроход» резцом с трехгранной сменной пластиной. Главный угол резца в плане 70°, подача 0,8 мм/об, а частота вращения заготовки 362 об/мин.

Какова глубина резания при точении, если машинное время операции составляет 30 секунд?

1.33. При подрезке торца диаметром 88 мм заготовка вращается с частотой 250 об/мин. Резец с трехгранной сменной пластиной работает с глубиной резания 5 мм и имеет главный угол в плане 70°.

Каково машинное время операции, если сечение среза при подрезке равно 2 мм²?

1.34. Длина заготовки, обрабатываемой «напроход», ровно в 18 раз больше глубины резания, которая используется при продольном точении этой заготовки резцом с квадратной сменной пластиной.

На сколько процентов и в какую сторону изменится машинное время операции, если вместо первоначально настроенного главного угла в плане 45° применить угол 75°?

1.35. Производительность процесса резания при проточке ступени длиной 21 мм и диаметром 71,8 мм на заготовке диаметром 80 мм составляет 123 см³/мин, а ширина среза 5 мм.

Каково машинное время операции?

1.36. При продольном точении скорость подачи инструмента составляет 200 мм/мин, а машинное время 1,5 мин.

Каким станет машинное время этой операции, если увеличить длину обработки на 36 мм и одновременно повысить частоту вращения заготовки в 1,2 раза?

1.37. При сверлении отверстия диаметром 10 мм и глубиной 67 мм производительность процесса резания составляет 22 см³/мин, а угол заборного конуса сверла 118°.

Каково машинное время операции?

1.38. При сверлении отверстия диаметром 20 мм и глубиной 64 мм с подачей 0,7 мм/об толщина среза, приходящаяся на каждую режущую кромку сверла, составляет 0,3 мм, а скорость резания 31,4 м/мин.

Каково машинное время операции?

1.39. Отверстие глубиной 24 мм и диаметром 6 мм рассверливают до диаметра 10 мм инструментом с углом заборного конуса 118°.

На сколько процентов возрастет машинное время операции, если при том же режиме резания увеличить глубину отверстия на 42 %?

1.40. В пластмассовой заготовке при помощи двухшпindelной сверлильной головки одновременно изготавливают отверстие диаметром 20 мм сверлом *A* с углом заборного конуса 110° и отверстие диаметром 18 мм сверлом *B* с углом заборного конуса 90°.

На сколько дальше от поверхности заготовки должна быть установлена вершина сверла *A* (по сравнению с вершиной сверла *B*), чтобы оба инструмента заканчивали рабочий ход одновременно?

1.41. Машинное время операции зенкерования отверстия диаметром 34 мм составляет 45 с. Угол заборного конуса инструмента 90°, его подача 0,2 мм/зуб, а скорость резания 23,5 м/мин.

Какова длина обрабатываемого отверстия, если глубина резания при зенкеровании равна 1 мм, а зенкер имеет 3 зуба?

1.42. Развертка диаметром 30 мм имеет 12 зубьев и угол заборного конуса 18°. Скорость резания при развертывании сквозного

отверстия глубиной 56 мм составляет 15 м/мин, глубина резания 0,2 мм, а подача 0,1 мм/зуб.

Каково машинное время операции?

1.43. Производительность процесса резания при развертывании отверстия диаметром 20 мм и длиной 100 мм составляет 3,17 см³/мин.

Каков угол заборного конуса инструмента, если при глубине резания 0,25 мм машинное время операции 30 с?

1.44. При цилиндрическом фрезеровании глубина резания равна 10 мм, скорость резания 35 м/мин, а скорость подачи инструмента 147 мм/мин.

Каково машинное время обработки заготовки длиной 264 мм, если фреза имеет 12 зубьев и подачу 0,11 мм/зуб?

1.45. С заготовки длиной 75 мм снимают припуск 5 мм цилиндрической фрезой диаметром 130 мм.

В какую сторону и насколько (в процентах) изменится машинное время операции, если при той же скорости подачи инструмента применить фрезу диаметром 85 мм?

1.46. С заготовки длиной 140 мм снимают припуск 10 мм цилиндрической фрезой диаметром 100 мм.

В какую сторону и насколько (в процентах) изменится машинное время операции, если при той же скорости резания и неизменной подаче инструмента применить фрезу диаметром 170 мм?

1.47. Машинное время при обработке заготовки шириной 40 мм и длиной 100 мм цилиндрической фрезой составляет 0,2 мин, производительность процесса резания 120 см³/мин, а глубина резания 5 мм.

Чему равен диаметр фрезы?

1.48. При обработке заготовки длиной 70 мм цилиндрической фрезой диаметром 100 мм машинное время операции составляет 24 секунды, а производительность процесса резания 170 см³/мин. Фреза работает с глубиной резания 10 мм и имеет 16 винтовых зубьев с углом подъема 30°.

Обеспечивается ли равномерность фрезерования на этой операции?

1.49. Цилиндрическая фреза диаметром 106 мм обрабатывает заготовку длиной 72 мм за машинное время 0,5 мин при скорости подачи 200 мм/мин.

С какой глубиной резания работает фреза?

1.50. Сколько зубьев имеет цилиндрическая фреза диаметром 100 мм, работающая с глубиной резания 10 мм, подачей 0,25 мм/зуб и скоростью резания 30 м/мин, если при фрезеровании заготовки длиной 352 мм машинное время составляет 1 мин?

Задания

Задание 1.1

При обработке заготовок прямозубой цилиндрической фрезой наименьший суммарный срез соответствует моменту входа очередного зуба в обрабатываемый материал, а наибольший – моменту выхода зуба.

Определите соотношение наименьшего и наибольшего суммарных срезов в процессе цилиндрического фрезерования.

Получите у преподавателя трехзначный номер варианта задания.

По первой цифре номера варианта возьмите данные из табл. 1.3, по второй – из табл. 1.4, по третьей – из табл. 1.5. Решение оформите в виде табл. 1.6.

Таблица 1.3

Диаметр фрезы, мм

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>D</i>	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110

Таблица 1.4

Число зубьев фрезы

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>z</i>	16		18		20		22		24	

Таблица 1.5

Глубина резания, мм

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>t</i>	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Таблица 1.6

Оформление решения задания 1.1

№ п/п	Рассчитываемая величина	Обозначение, размерность	Формула или номер формулы	Результат расчета
1	Угол контакта зуба фрезы с заготовкой	τ , град	(1.13)	
2	Угол между зубьями фрезы	ε_z , град	$\varepsilon_z = 360/z$	
3	Число одновременно работающих зубьев	q	(1.11)	
4	Углы поворота зубьев в момент снятия наименьшего суммарного среза	μ_{1i} , град (i – номер зуба)	$\mu_{1i} = \varepsilon_v(q - i)$	
5	Углы поворота зубьев в момент снятия наибольшего суммарного среза	μ_{2i} , град (i – номер зуба)	$\mu_{2i} = \tau - \varepsilon_z(i - 1)$	
6	Наименьшее суммарное мгновенное сечение среза	$f_{\mu 1}$, мм ²	(1.14)	
7	Наибольшее суммарное мгновенное сечение среза	$f_{\mu 2}$, мм ²		
8	Соотношение наименьшего и наибольшего суммарных срезов	k	$k = f_{\mu 1}/f_{\mu 2}$	

Задание 1.2

При обработке заготовки на токарном станке с ЧПУ на продольном суппорте 1 установлен проходной резец, работающий с подачей s_{o1} , а на поперечном суппорте 2 – подрезной резец со сменной пластиной, имеющей i_{rp} граней (рис. 1.4). В плане пластина имеет вид правильного многоугольника.

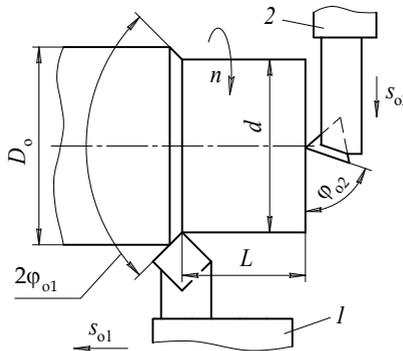


Рис. 1.4. К заданию 1.2

Подрезной резец работает с глубиной резания t_2 и начинает рабочий ход через время Δt после проходного.

Определите, какой должна быть подача поперечного суппорта s_{o2} (мм/об), чтобы оба резца заканчивали рабочий ход одновременно.

Получите у преподавателя трехзначный номер варианта задания.

По первой цифре номера варианта возьмите данные из табл. 1.7, по второй – из табл. 1.8, по третьей – из табл. 1.9. Решение оформите в виде табл. 1.10.

Таблица 1.7

Размеры заготовки, мм

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_o	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60
d	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50
L	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40

Таблица 1.8

Частота вращения заготовки, об/мин

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>n</i>	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380

Таблица 1.9

Другие параметры наладки

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s_{01} , мм/об		0,4		0,5		0,6		0,7		0,8	
t_2 , мм		4		3,5		3		2,5		2	
Главные углы в плане, град	φ_{01}	30				45					
	φ_{02}	45				70					
$i_{гр}$		4				3					
$\Delta\tau$, мин		0,10				0,05					

Таблица 1.10

Оформление решения задания 1.2

№ п/п	Рассчитываемая величина	Обозначение, размерность	Формула или номер формулы	Результат расчета
Проходной резец <i>l</i>				
1	Глубина резания	t_1 , мм	$t_1 = (D_o - d) / 2$	
2	Врезание	y_{11} , мм	табл. 1.2	
3	Перебег (точение ступени конкретной длины)	y_{21} , мм		
4	Скорость движения подачи	v_{s1} , мм/мин	(1.4)	
5	Машинное время	τ_{M1} , мин	(1.22)	

Окончание табл. 1.10

№ п/п	Рассчитываемая величина	Обозначение, размерность	Формула или номер формулы	Результат расчета
Подрезной резец 2				
6	Машинное время	$\tau_{м2}$, мин	$\tau_{м2} = \tau_{м1} - \Delta\tau$	
7	Угол между гранями пластины	ε , град	$\varepsilon = 180(1 - 2/i_{гр})$	
8	Вспомогательный угол в плане	φ_{12} , град	$\varphi_{12} = 180 - \varphi_{о2} - \varepsilon$	
9	Длина обработки	L_2 , мм	$L_2 = d / 2$	
10	Врезание	y_{12} , мм	табл. 1.2	
11	Перебег (точение «напроход»)	y_{22} , мм		
12	Скорость движения подачи	v_{s2} , мм/мин	(1.22)	
13	Подача подрезного резца	$s_{о2}$, мм/об	(1.4)	

Глава 2. ДЕФОРМАЦИИ И СИЛЫ ПРИ РЕЗАНИИ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Обозначения

В рисунках, пояснительном тексте, задачах, заданиях и решениях главы 2 использованы обозначения, приведенные в главе 1 и табл. 2.1.

Таблица 2.1

Обозначения и размерности некоторых величин

Наименование величины	Обозначение	Размерность
Средняя толщина стружки	a_1	мм
Средний диаметр хвостовика инструмента	\bar{d}	
Вылет инструмента	L_0	
Длина контактной площадки на передней/задней поверхности лезвия	l_1/l_2	Н
Сила, действующая по нормали к передней/задней поверхности лезвия	N_1/N_2	
Сила трения на передней/задней поверхности лезвия	F_1/F_2	МПа
Предел прочности обрабатываемого материала	σ_b	
Допускаемое напряжение изгиба	$[\sigma_u]$	град
Передний угол лезвия	γ	
Главный задний угол лезвия	a	
Угол резания	d	—
КПД привода главного движения	η	
Конусность хвостовика инструмента	r	

Элементы теории

При фактически применяемых в машиностроении скоростях резания ширина зоны упруго-пластического деформирования, возникающей в процессе снятия стружки, настолько мала, что эту зону можно считать плоскостью P_Φ (рис. 2.1), наклоненной к линии действия вектора v скорости главного движения под углом сдвига Φ :

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma}. \quad (2.1)$$

Здесь

$$K_a = \frac{a_1}{a_z} \quad (2.2)$$

– коэффициент утолщения стружки.

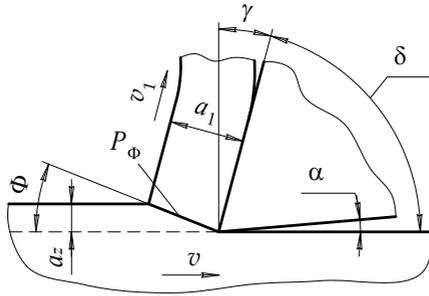


Рис. 2.1. Схема резания с единственной плоскостью сдвига

Средняя скорость схода стружки в условиях резания с единственной плоскостью сдвига

$$v_1 = \frac{v}{K_a}, \text{ м/мин}, \quad (2.3)$$

а максимальная относительная деформация (относительный сдвиг)

$$\varepsilon_0 = \operatorname{ctg} \Phi + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma). \quad (2.4)$$

Силу резания P (равнодействующую всех сил, приложенных к одному лезвию инструмента в процессе резания) принято раскладывать на три взаимно перпендикулярные составляющие:

– главную

$$P_z = N_1 \cos \gamma + F_1 \sin \gamma + F_2, \text{ Н}; \quad (2.5)$$

– осевую

$$P_x = P_N \sin \varphi, \text{ Н}; \quad (2.6)$$

– радиальную

$$P_y = P_N \cos \varphi, \text{ Н}, \quad (2.7)$$

где

$$P_N = F_1 \cos \gamma - N_1 \sin \gamma + N_2, \text{ Н}. \quad (2.8)$$

В целом ряде случаев удобно вместо сосредоточенных сил $N_{1,2}$ и $F_{1,2}$ использовать усредненные распределенные нагрузки на контактных площадках (удельные силы)

$$\left. \begin{aligned} n_{1,2} &= \frac{N_{1,2}}{bl_{1,2}}, \text{ МПа}; \\ f_{1,2} &= \frac{F_{1,2}}{bl_{1,2}}, \text{ МПа}. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Теоретический анализ напряженного состояния в зоне резания показывает, что без учета сил, действующих на заднюю поверхность инструмента,

$$P_z \approx 0,9a_z b \sigma_b (\text{ctg } \Phi + 1), \text{ Н}; \quad (2.10)$$

$$P_N \approx 0,9a_z b \sigma_b (\text{ctg } \Phi - 1), \text{ Н}. \quad (2.11)$$

При фрезеровании, когда сечение среза, в общем случае, переменено во времени и зависит от угла μ_i поворота i -го участвующего в работе зуба фрезы (см. гл. 1), силу резания раскладывают на горизонтальную

$$P_H = \sum_{i=1}^q P_{zi} \cos \mu_i \pm \sum_{i=1}^q P_{Ni} \sin \mu_i, \text{ Н} \quad (2.12)$$

и вертикальную

$$P_V = \sum_{i=1}^q P_{zi} \sin \mu_i \mp \sum_{i=1}^q P_{Ni} \cos \mu_i, \text{ Н} \quad (2.13)$$

составляющие. В формулах (2.12) и (2.13) верхние знаки относятся к встречному, а нижние – к попутному фрезерованию; q – количество одновременно работающих зубьев; P_{zi} и P_{Ni} – главная и нормальная составляющие силы резания P_i , действующей на отдельный зуб.

При вращательном главном движении на осевой инструмент (сверло, зенкер, развертку) действует крутящий момент

$$M = \frac{D-t}{2000} z P_z, \text{ Н} \cdot \text{ м}, \quad (2.14)$$

а на цилиндрическую фрезу – момент

$$M = \frac{D}{2000} \sum_{i=1}^q P_{zi}, \text{ Н} \cdot \text{ м}. \quad (2.15)$$

Относительная неравномерность процесса резания при фрезеровании

$$\Delta M = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\max}} \cdot 100 \% = \frac{M_{1\max}}{M_{\max}} \cdot 100 \%, \quad (2.16)$$

где M_{\max} и M_{\min} – соответственно наибольший и наименьший крутящие моменты на фрезе; $M_{1\max}$ – наибольший момент на этой же фрезе в случае, если бы в работе находился всего один зуб инструмента.

Формулы для расчета сил при резании имеют широкое практическое применение.

При проектировании металлорежущих станков мощность электродвигателя привода главного движения выбирают из соотношения

$$W > \frac{W_3}{\eta}, \quad (2.17)$$

где эффективная мощность процесса резания

$$W_3 = \frac{P_z v}{60}, \text{ Вт}, \quad (2.18)$$

или, при вращательном главном движении и многолезвийном инструменте,

$$W_3 = \frac{\pi}{30} M n, \text{ Вт}. \quad (2.19)$$

Тяговое усилие привода подачи выбирают из условия

$$P_T > P_x + \xi(P_y + P_z + G), \quad (2.20)$$

в котором ξ – коэффициент трения скольжения стола (суппорта) станка по направляющим; G – вес стола (суппорта), Н.

При расчете фрезерных станков условие (2.20) принимает вид

$$P_{\tau} > P_H + \xi(P_V + G). \quad (2.21)$$

При проектировании осевого инструмента выбор конического хвостовика производится из условия

$$M_{\text{тр}} > M, \quad (2.22)$$

в котором момент трения, возникающий на хвостовике,

$$M_{\text{тр}} \approx 6 \cdot 10^{-5} P_{\text{ос}} \frac{\bar{d}}{\rho}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.23)$$

В формуле (2.23) $P_{\text{ос}} = zP_x$ – осевая сила, действующая на инструмент, Н.

Если выполняется условие

$$\arctg \frac{P_N}{P_z} > \alpha, \quad (2.24)$$

то режущая пластина надежно прижимается к державке токарного резца силой резания и не требует дополнительного закрепления.

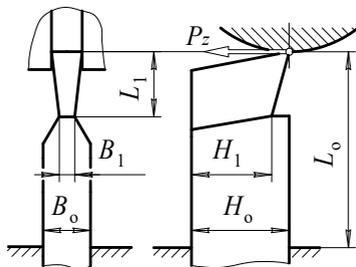


Рис. 2.2. К расчету прочности резца

Токарный или строгальный резец с сечением державки $B_o \times H_o$, мм² (рис. 2.2) не сломается в месте его закрепления в резцедержателе, если будет выполнено условие

$$\frac{6L_o}{B_o H_o^2} P_z \leq [\sigma_n]. \quad (2.25)$$

Расчет напряжений в других опасных сечениях инструмента (например, в сечении $B_1 \times H_1$, рис. 2.2) производится по той же формуле (2.25) с подстановкой в нее соответствующих размеров.

Примеры решения задач

Задача 2а. Подача проходного резца 0,5 мм/об, главный угол в плане 50° , а угол резания 80° . Исследование корней стружек показало, что угол, под которым плоскость сдвига наклонена к вектору скорости резания, составляет 22° .

Какую среднюю толщину имеет стружка, снимаемая на этой операции?

Решение

Теоретическое значение средней толщины стружки при работе однолезвийным инструментом ($a_z = a$) получим из формулы (2.2):

$$a_1 = aK_a, \text{ мм}$$

или, с учетом (1.7),

$$a_1 = s_o K_a \sin \varphi, \text{ мм.} \quad (2.26)$$

Коэффициент утолщения стружки найдем, преобразуя зависимость (2.1):

$$K_a = \operatorname{ctg} \Phi \cos \gamma + \sin \gamma = \frac{\cos \Phi \cos \gamma + \sin \Phi \sin \gamma}{\sin \Phi} = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}. \quad (2.27)$$

Так как $\gamma = 90^\circ - \delta$ (рис. 2.1), выражение (2.27) приобретает вид

$$K_a = \frac{\sin(\Phi + \delta)}{\sin \Phi}. \quad (2.28)$$

Подставляя (2.28) в (2.26), окончательно имеем

$$a_1 = \frac{\sin(\Phi + \delta) \sin \varphi}{\sin \Phi} s_o, \text{ мм.} \quad (2.29)$$

Расчет по формуле (2.29) показывает, что при заданных в условии задачи величинах $a_1 = 1$ мм.

Задача 2б. Заготовку шириной 50 мм из легированной стали, предел прочности которой 610 МПа, обрабатывают цилиндрической фрезой диаметром 102 мм. Фреза имеет 20 прямых зубьев с передним углом 14° и работает в условиях встречного фрезерования со скоростью резания 32 м/мин, скоростью подачи 200 мм/мин и глубиной резания 7 мм. Измерения показали, что средний коэффициент утолщения стружки составляет 1,6.

Какую наибольшую суммарную силу резания можно ожидать на этой операции, если пренебречь силами, действующими на задние поверхности зубьев фрезы?

Решение

Отдельный зуб фрезы представляет собой режущий клин, для которого (если не учитывать силы, действующие на заднюю поверхность) справедливы соотношения (2.10) и (2.11). Однако в связи с переменностью толщины среза при фрезеровании величина a в этих выражениях будет зависеть от угла μ_i поворота i -го работающего зуба фрезы (см. гл. 1) и должна рассчитываться по формуле (1.12).

Для поиска углов μ_i определим, сколько зубьев фрезы одновременно участвует в работе. Расчет по формуле (1.11) показывает, что $q = 2$.

Наибольшая суммарная сила резания возникает в момент времени, когда суммарное сечение среза на одновременно работающих зубьях фрезы достигает максимума, то есть первый зуб находится на выходе из заготовки ($\mu_1 = \tau$). Используя формулу (1.13), получаем

$$\mu_1 = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}. \quad (2.30)$$

Второй зуб будет отставать от первого на угол $\varepsilon_z = 360/z$, то есть

$$\mu_2 = \tau - \varepsilon_z = \frac{360}{\pi} \left(\sqrt{\frac{t}{D}} - \frac{\pi}{z} \right). \quad (2.31)$$

Подачу на зуб найдем, последовательно используя выражения (1.5), (1.4) и (1.3):

$$s_z = \frac{s_0}{z} = \frac{v_s}{nz} = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{D}{z} \cdot \frac{v_s}{v}, \text{ мм/зуб}. \quad (2.32)$$

Теперь с помощью (2.10), (1.12), (2.31), (2.32) и (2.1), а также имея в виду, что при работе прямозубой фрезы ширина среза равна ширине фрезерования, находим:

$$\begin{aligned} P_{z1} &\approx 9 \cdot 10^{-4} \frac{\pi DB \sigma_B}{z} \cdot \frac{v_s}{v} \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right) \sin \left(\frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \right); \\ P_{z2} &\approx 9 \cdot 10^{-4} \frac{\pi DB \sigma_B}{z} \cdot \frac{v_s}{v} \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right) \sin \left(\frac{360}{\pi} \left(\sqrt{\frac{t}{D}} - \frac{\pi}{z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.33)$$

откуда $P_{z1} \approx 3300 \text{ Н}$, $P_{z2} \approx 1370 \text{ Н}$.

Преобразовав формулу (2.11) по аналогии с (2.33) и подставив в нее исходные данные, получим $P_{N1} \approx 550$ Н, $P_{N2} \approx 230$ Н.

Для расчета горизонтальной и вертикальной составляющих силы резания воспользуемся зависимостями (2.12) и (2.13), которые в нашем случае (встречное фрезерование и два одновременно работающих зуба, первый из которых находится на выходе из заготовки) принимают вид

$$P_H = P_{z1} \cos \tau + P_{z2} \cos(\tau - \varepsilon_z) + P_{N1} \sin \tau + P_{N2} \sin(\tau - \varepsilon_z);$$

$$P_V = P_{z1} \sin \tau + P_{z2} \sin(\tau - \varepsilon_z) - P_{N1} \cos \tau - P_{N2} \cos(\tau - \varepsilon_z),$$

откуда $P_H \approx 4520$ Н и $P_V \approx 1230$ Н.

Наибольшая суммарная сила резания, которую можно ожидать, если пренебречь силами, действующими на задние поверхности зубьев:

$$P = \sqrt{P_H^2 + P_V^2} \approx 4700 \text{ Н.}$$

Задача 2в. При сверлении отверстия в стальной заготовке экспериментально получены формулы для крутящего момента и осевой силы, действующих на инструмент, в виде $M = 0,345D^2s_0^{0,8}$, Н · м; $P_{oc} = 680Ds_0^{0,7}$, Н.

Производительность процесса резания составляет 164 см³/мин при частоте вращения сверла 200 об/мин.

Какой наименьший конус Морзе должен быть выполнен на хвостовике инструмента, чтобы он не провернулся в гнезде шпинделя станка при работе с суммарным сечением среза 8,7 мм²?

Решение

Для выбора хвостовика инструмента потребуется воспользоваться приведенными в условии задачи эмпирическими формулами, в которые входят не заданные напрямую диаметр сверла и его подача. Найдем эти величины.

Подставляя в выражение (1.20) соотношения (1.6) и (1.3), получаем

$$\Pi = f \frac{\pi D n}{1000}, \text{ см}^3/\text{мин},$$

откуда

$$D = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{\Pi}{nf}, \text{ мм.} \quad (2.34)$$

Из формулы (1.6), учитывая, что при сверлении $t = D/2$, получаем

$$s_o = \frac{2f}{D}, \text{ мм/об,}$$

или, с учетом (2.34),

$$s_o = \frac{\pi}{500} \cdot \frac{\eta f^2}{\Pi}, \text{ мм/об.} \quad (2.35)$$

Расчет по формулам (2.34) и (2.35) показывает, что при заданных в условии величинах диаметр сверла $D = 30$ мм, а его подача $s_o = 0,58$ мм/об.

Подставляя полученные значения D и s_o в формулы для крутящего момента и осевой силы, находим, что $M \approx 200$ Н·м и $P_{oc} \approx 13\,900$ Н.

Чтобы сверло не провернулось в гнезде шпинделя станка, должно выполняться условие (2.22), которое с учетом (2.23) принимает вид

$$6 \cdot 10^{-5} P_{oc} \frac{\bar{d}}{\rho} > M. \quad (2.36)$$

Из неравенства (2.36) следует, что

$$\frac{\bar{d}}{\rho} > \frac{10^5}{6} \cdot \frac{M}{P_{oc}}, \text{ мм.} \quad (2.37)$$

При рассчитанных выше значениях M и P_{oc} из выражения (2.36) получаем, что сверло не провернется при $\bar{d}/\rho > 240$ мм. В таблице прил. 1 находим, что наименьший из конусов, соответствующих этому условию, – конус Морзе 2, у которого $\bar{d}/\rho = 324$ мм.

Задачи

2.01. Заготовку диаметром 100 мм обтачивают резцом с главным углом в плане 75° при скорости подачи инструмента 178 мм/мин.

Какова средняя скорость схода стружки на этой операции, если толщина стружки составляет 1 мм?

2.02. При точении заготовки диаметром 56 мм, которая вращается с частотой 250 об/мин, средняя толщина стружки составляет 0,9 мм.

С какой средней скоростью перемещается стружка вдоль передней поверхности инструмента, если резец имеет главный угол в плане 55° и работает с подачей 1 мм/об?

2.03. Производительность процесса резания при точении 270 см³/мин, ширина среза 4 мм, а толщина стружки 1,5 мм.

Какова средняя скорость схода стружки на этой операции?

2.04. Сечение среза при продольном точении заготовки резцом с передним углом 18° и главным углом в плане 45° составляет 6 мм², а глубина резания 4 мм.

Какой максимальной величиной относительной деформации характеризуется этот процесс, если средняя толщина сходящейся с резца стружки 2 мм?

2.05. Проходной токарный резец с трехгранной пластиной, расположенной так, что вспомогательный угол в плане равен 30°, работает с подачей 1 мм/об и снимает стружку толщиной 1,1 мм.

Какова наибольшая относительная деформация срезаемого на этой операции слоя материала, если передний угол резца 20°?

2.06. При обточке заготовки угол сдвига составляет 19°, а коэффициент утолщения стружки 2,9.

Какой наибольшей относительной сдвиговой деформацией характеризуется это процесс, если известно, что передний угол резца не равен нулю?

2.07. Сверло диаметром 40 мм работает со скоростью подачи 204 мм/мин. Измерения показали, что в процессе сверления стружка имеет среднюю толщину 0,5 мм и движется со средней скоростью 21 м/мин.

Какой угол заборного конуса имеет сверло?

2.08. Отверстие диаметром 15 мм обрабатывают сверлом с углом заборного конуса 106° при производительности процесса резания 270 см³/мин и средней толщине стружки 0,6 мм.

Какова средняя скорость схода стружки на этой операции?

2.09. При обработке заготовки резцом с передним углом 0° и главным углом в плане 55° экспериментально получено, что длина площадки контакта между стружкой и резцом 1,4 мм, а главная составляющая силы резания описывается зависимостью $P_z = 2340ba^{0,75}v^{-0,15}$, Н.

Какой будет удельная нормальная сила на передней поверхности инструмента при скорости резания 40 м/мин и подаче 0,8 мм/об, если пренебречь силами, действующими на его задней поверхности?

2.10. Какой будет удельная сила трения на передней поверхности резца в условиях задачи 2.09, если известно, что $P_y = 0,41P_z$?

2.11. При продольном точении заготовки глубина резания 5 мм, передний угол резца (-8°) и главный угол в плане 90° . На площадке контакта инструмента со стружкой удельная нормальная сила составляет 1400 МПа, а удельная сила трения 600 МПа. На площадке контакта по задней поверхности инструмента эти силы 650 и 610 МПа соответственно.

Какова сила резания на этой операции, если длина контактной площадки на передней поверхности резца 1,2 мм, а на задней поверхности 0,2 мм?

2.12. Сила резания при работе токарного резца 10 кН, а ее главная составляющая 8 кН. Передний угол резца 0° , ширина среза при точении 4 мм. На передней поверхности инструмента удельная нормальная сила 1000 МПа, а удельная сила трения 500 МПа.

Какова длина площадки контакта стружки с передней поверхностью резца, если известно, что удельная нормальная сила и удельная сила трения на его задней поверхности численно равны?

2.13. Главная, осевая и радиальная составляющие силы резания при точении 8700, 1800 и 2400 Н соответственно. На площадке контакта по задней поверхности резца удельная нормальная сила равна удельной силе трения и составляет 500 МПа. Передний угол резца 12° , ширина среза при точении 10 мм.

Какова длина площадки контакта на задней поверхности инструмента, если известно, что на его передней поверхности удельная нормальная сила в два раза больше удельной силы трения?

2.14. Удельная нормальная сила на передней поверхности проходного резца 1200 МПа, а на задней поверхности 400 МПа. Передний угол резца 0° , ширина среза при точении 6 мм, площадки

контакта на передней и задней поверхностях инструмента имеют длины 1,1 и 0,2 мм соответственно.

Каковы удельные силы трения на поверхностях резца, если сила резания равна 9500 Н, а ее главная составляющая 8400 Н?

2.15. При сверлении отверстия диаметром 15 мм средняя длина площадки контакта лезвия инструмента со стружкой 1 мм, а удельная сила трения на этой площадке 400 МПа. Передний угол сверла в средней точке главной режущей кромки близок к нулю.

Какая осевая сила будет действовать на сверло в случае, когда силами на его задних поверхностях допустимо пренебречь?

2.16. Каким будет крутящий момент на сверле в условиях задачи 2.15, если угол его заборного конуса 120° , а удельная нормальная сила на передней поверхности отдельного лезвия 1170 МПа?

2.17. При точении стали, предел прочности которой 650 МПа, применяются резец с передним углом 10° , скорость резания 91 м/мин, подача 0,7 мм/об и глубина резания 6 мм.

Экспериментально получено, что главная составляющая силы резания описывается зависимостью $P_z = 40t^{0,75} v^{-0,15} \sigma^{0,95}$, Н, осевая и радиальная составляющие достигают соответственно 25 и 40 % от P_z , а средний коэффициент утолщения стружки равен 2,1.

Насколько (в процентах) отличаются результаты расчета силы резания по эмпирическим соотношениям и по формулам, выведенным на основании анализа напряженного состояния в зоне резания?

2.18. Производительность процесса резания при точении стали, предел прочности которой 750 МПа, составляет 185 см³/мин, а передний угол инструмента $(-10)^\circ$. Измерения показали, что осевая и радиальная составляющие силы резания равны 1,5 и 2 кН соответственно.

С какой скоростью перемещается стружка вдоль передней поверхности инструмента, если силами, действующими на его задней поверхности, можно пренебречь, а скорость резания на этой операции 40 м/мин?

2.19. Какая сила резания действует на инструмент в условиях задачи 2.18 и какова эффективная мощность процесса резания?

2.20. Заготовку диаметром 64 мм из стали, имеющей предел прочности 480 МПа, обтачивают резцом с передним углом 8° при глубине резания 4 мм и скорости подачи 200 мм/мин.

Какова эффективная мощность процесса резания, если коэффициент утолщения стружки равен 1,8, а силами на задней поверхности резца можно пренебречь?

2.21. На начальной стадии процесса точения, когда износ инструмента практически отсутствует ($l_2 \rightarrow 0$), главная составляющая силы резания может быть рассчитана по эмпирической формуле $P_z = 60ts_0^{0,75}v^{-0,15}\delta^{0,8}$, Н.

Какова наибольшая относительная деформация стружки на этой стадии процесса, если передний угол резца 0° , подача 0,8 мм/об, скорость резания 37 м/мин, а предел прочности обрабатываемого материала 500 МПа?

2.22. Угол сдвига при точении составляет 35° , главный задний угол резца 12° , а износ инструмента по задней поверхности настолько мал, что возникающими на ней силами допустимо пренебречь.

Можно ли в этих условиях закрепить режущую пластину инструмента только силой резания?

2.23. Измерения показали, что при продольном точении заготовки резцом с многогранной сменной пластиной сила резания равна 6800 Н, а ее радиальная составляющая 400 Н.

Можно ли на этой операции обеспечить крепление пластины силой резания, если главный задний угол резца 6° , а главный угол в плане 65° ?

2.24. Какой наибольший целый задний угол допустимо придать инструменту в условиях задачи 2.23, чтобы было возможно крепление пластины силой резания при главном угле резца в плане 45° ?

2.25. Сила резания при точении заготовки резцом со сменной пластиной составляет 4300 Н, а скорость резания 52 м/мин.

При какой наибольшей эффективной мощности процесса возможно крепление пластины силой резания, если главный задний угол инструмента 9° ?

2.26. Проходной токарный резец со сменной пластиной имеет главный задний угол 10° . Сила резания в процессе обработки заготовки этим резцом равна 5200 Н, а ее осевая составляющая 700 Н.

При каком наибольшем целом значении главного угла инструмента в плане возможно крепление пластины силой резания?

2.27. При точении заготовки из жаропрочной стали экспериментальным путем получена формула $P_z = 58ts_0^{0,75}v^{-0,05}\delta^{0,9}$, Н.

Какова эффективная мощность процесса резания при обработке заготовки диаметром 96 мм из этой стали резцом с передним углом $(-5)^\circ$, если диаметр обработанной поверхности 90 мм, скорость подачи резца 120 мм/мин, а скорость резания 45 м/мин?

2.28. С какой наибольшей частотой вращения можно обрабатывать заготовку в условиях задачи 2.27, если использовать токарный станок с мощностью привода главного движения 8 кВт при КПД привода 0,83?

2.29. Экспериментально получено, что главная составляющая силы резания при продольном точении заготовки инструментом с передним углом 10° описывается зависимостью $P_z = 40ts_0^{0,75}v^{-0,15}\delta^{0,95}$, Н, осевая и радиальная составляющие достигают соответственно 25 и 40 % от P_z , а коэффициент трения скольжения суппорта массой 100 кг по направляющим равен 0,1.

Достаточно ли тяговой силы в 4 кН, развиваемой механизмом подачи станка, чтобы обеспечить производительность процесса резания 202 см³/мин при глубине резания 8 мм и подаче 0,6 мм/об?

2.30. Эффективная мощность процесса резания при точении заготовки резцом с главным углом в плане 55° составляет 6400 Вт, а сила резания 8 кН. Продольный суппорт станка имеет массу 100 кг и коэффициент трения с направляющими 0,1.

Какую наименьшую силу тяги (с точностью до 1 кН) должен развивать привод подачи станка, чтобы обеспечить обработку заготовки со скоростью резания 60 м/мин?

2.31. Резцом с главным углом в плане 90° обрабатывают заготовку, которая вращается с частотой 200 об/мин. Эксперимент показал, что для этого процесса характерно соотношение $P_N \approx 0,4P_z$. Продольный суппорт станка весит 1 кН и имеет коэффициент трения по направляющим 0,1. Предельно допустимая сила тяги механизма подачи станка 4 кН.

При каком наименьшем целочисленном диаметре заготовки возможна ее обработка с эффективной мощностью процесса резания 8100 Вт?

2.32. Во сколько раз, как минимум, сила P_z должна превосходить силу P_N , чтобы в условиях задачи 2.31 была возможна обработка заготовки со скоростью резания 75 м/мин?

2.33. Экспериментально получено, что при обработке заготовки однолезвийным инструментом $P_z = 1676ba^{0,75}v^{-0,15}$ и $P_N = 214b^{0,9}a^{0,6}v^{0,1}$, Н.

Какие крутящий момент и осевая сила будут действовать на трехзубый зенкер диаметром 40 мм при обработке такой же заготовки с глубиной резания 0,6 мм, подачей 0,9 мм/об и скоростью резания 30 м/мин, если угол заборного конуса инструмента 120° ?

2.34. С какой подачей должен работать инструмент в условиях задачи 2.33, чтобы эффективная мощность процесса зенкерования составила 465 Вт?

2.35. При работе четырехзубого зенкера диаметром 36 мм с углом заборного конуса 120° осевая сила составляет 240 Н, а сила резания на отдельном зубе 290 Н.

Какой крутящий момент действует на инструмент, если диаметр отверстия под зенкерование 35 мм?

2.36. Крутящий момент при рассверливании отверстия диаметром 20 мм до диаметра 30 мм составляет 72 Н · м, а осевая сила 480 Н.

Какая сила резания действует на отдельное лезвие сверла, если угол его заборного конуса 90° ?

2.37. Заготовку шириной 58 мм из конструкционной стали обрабатывают цилиндрической прямозубой фрезой диаметром 105 мм, которая имеет 15 зубьев с передним углом 10° . Глубина резания при фрезеровании 3,2 мм, скорость подачи инструмента 285 мм/мин, а частота вращения фрезы 100 об/мин.

Какой наибольший крутящий момент действует на фрезу, если известно, что при обработке этой же стали однолезвийным инструментом значение главной составляющей силы резания (в ньютонах) может быть рассчитано по эмпирической формуле $P_z = 35ba^{0,75}v^{-0,15}\delta^{0,94}$?

2.38. Какой станет относительная неравномерность процесса фрезерования в условиях задачи 2.37, если увеличить глубину резания до 9,8 мм?

2.39. Цилиндрическая фреза имеет пятнадцать прямых зубьев с окружным шагом 22 мм и работает с глубиной резания 5 мм.

Эксперимент показал, что главная составляющая силы резания на отдельном зубе фрезы прямо пропорциональна сечению среза, которое снимает этот зуб.

Какова относительная неравномерность процесса фрезерования?

2.40. Производительность процесса резания при фрезеровании заготовки шириной 52 мм составляет 227 см³/мин. Цилиндрическая прямозубая фреза имеет 36 зубьев и работает со скоростью резания 40 м/мин при подаче 0,2 мм/зуб.

Как и в задаче 2.39, главная составляющая силы резания на отдельном зубе фрезы прямо пропорциональна сечению среза, которое снимает этот зуб.

Какова относительная неравномерность процесса фрезерования?

2.41. При глубине резания 4 мм и скорости резания 30 м/мин наибольший крутящий момент на цилиндрической прямозубой фрезу, имеющей 12 зубьев и диаметр 100 мм, составляет 400 Н · м.

Измерения показали, что при использовании фрезы такого же диаметра, но с бóльшим числом зубьев, относительная неравномерность процесса фрезерования снижается до 80 %.

Какова эффективная мощность резания при работе новой фрезы?

2.42. Эмпирически получено, что силы, действующие на отдельный зуб прямозубой цилиндрической фрезы при определенных скорости резания и ширине среза, описываются выражениями $P_z = 55a_z^{0,75}$ и $P_N = 16a_z^{0,5}$, кН.

Какая наибольшая горизонтальная сила будет действовать на фрезу диаметром 124 мм, которая имеет 20 зубьев и работает с глубиной резания 5 мм и подачей 3 мм/об, в условиях встречного фрезерования?

2.43. Какой станет наибольшая горизонтальная сила в условиях задачи 2.42, если использовать не встречное, а попутное фрезерование?

2.44. Цилиндрическая фреза имеет диаметр 115 мм и шестнадцать прямых зубьев и обрабатывает заготовку по схеме встречного фрезерования с глубиной резания 3,5 мм и частотой вращения 120 об/мин.

В тот момент процесса резания, когда горизонтальная сила на инструменте достигает наибольшего значения и составляет 6 кН, вертикальная сила равна 2,9 кН.

Можно ли осуществить эту операцию на станке с мощностью привода главного движения 5 кВт при КПД привода 80 %?

2.45. Угол контакта цилиндрической фрезы диаметром 160 мм с заготовкой 30° . При фрезеровании по попутной схеме в тот момент процесса резания, когда вертикальная сила на инструменте минимальна и равна 3270 Н, горизонтальная сила составляет 4500 Н.

Какой крутящий момент действует на инструмент в этот момент времени, если фреза имеет 18 зубьев?

2.46. Какой наименьший конус Морзе может иметь хвостовик сверла при обработке отверстия диаметром 8 мм с подачей

0,1 мм/зуб, если эмпирические формулы для расчета момента резания и осевой силы при сверлении имеют вид $M = 0,2D^2s_0^{0,7}$, Н · м; $P_{oc} = 208Ds_0^{0,8}$, Н?

2.47. При сверлении отверстия диаметром 26 мм экспериментально получены формулы для крутящего момента и осевой силы, действующих на инструмент, в виде $M = 0,345D^2s_0^{0,8}$, Н · м; $P_{oc} = 680Ds_0^{0,7}$, Н.

С какой наибольшей подачей на зуб может работать сверло, чтобы его хвостовик – конус Морзе 1 – не провернулся в шпинделе станка?

2.48. Сверло диаметром 40 мм работает с подачей 0,24 мм/об и имеет хвостовик в виде конуса Морзе 2. Эксперимент показал, что осевая сила на сверле описывается выражением $P_{oc} = 353Ds_0^{0,7}$, Н.

Какую максимальную частоту вращения можно придать сверлу, если мощность электродвигателя станка 2 кВт, а КПД привода 0,85?

2.49. Заготовку из стали с пределом прочности 600 МПа разрезают отрезным резцом (рис. 2.3) с подачей 0,3 мм/об. Передний угол резца 8° , сечение державки 12×20 мм².

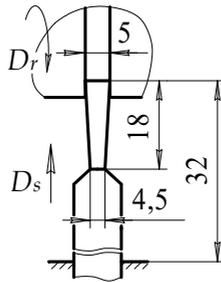


Рис. 2.3. К задаче 2.49

Измерения показали, что средний коэффициент утолщения стружки на этой операции 1,9.

Какие напряжения возникнут в опасном сечении резца и в месте его закрепления в резцедержателе, если при анализе динамики процесса резания можно пренебречь силами, действующими на задней поверхности инструмента?

2.50. Какой наибольший целочисленный вылет (исходя из прочности державки) можно придать токарному резцу с главным углом в плане 45° и сечением державки $16 \times 20 \text{ мм}^2$, если сила резания при точении равна 7200 Н , ее радиальная составляющая 2400 Н , а допускаемое напряжение изгиба для материала державки 300 МПа ?

Задания

Задание 2.1

При обработке заготовки из конструкционной стали, вращающейся с частотой n , проходные резцы 1 и 2 и сверло 3 объединены в многоинструментальную наладку (рис. 2.4), параметры которой приведены в табл. 2.1–2.3.

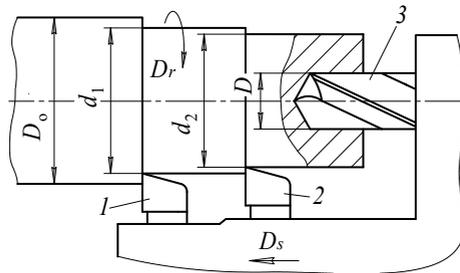


Рис. 2.4. К заданию 2.1

Как показал эксперимент, при обработке этой стали однолезвийным инструментом главная составляющая силы резания описывается выражением

$$P_r = 40ba^{0,75}v^{-0,15}\delta^{0,8}, \text{ Н},$$

а крутящий момент на сверле – выражением

$$M = 0,34D^2s_o^{0,8}, \text{ Н} \cdot \text{ м},$$

где $a \times b$ – сечение среза, мм^2 ; v – скорость резания, м/мин ; δ – угол резания, град; D – диаметр сверла, мм ; s_o – подача, мм/об .

Определите, при какой минимальной мощности двигателя привода главного движения станка можно осуществить эту технологическую операцию, если КПД привода 90% .

Получите у преподавателя трехзначный номер варианта задания.

По первой цифре номера варианта возьмите данные из табл. 2.2, по второй – из табл. 2.3, по третьей – из табл. 2.4. Решение оформите в виде табл. 2.5.

Таблица 2.2

Диаметры заготовки, мм

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_o	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90
d_1	167	158	149	140	131	122	113	104	95	86
d_2	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70

Таблица 2.3

Диаметр отверстия, мм

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48

Таблица 2.4

Другие параметры наладки

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
s_o , мм/об		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	
n , об/мин		300				220			140			
Перед- ний угол, град	резец 1	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
	резец 2	10					-10					

Оформление решения задания 2.1

№ п/п	Рассчитываемая величина	Обозначение, размерность	Формула или номер формулы	Результат расчета
1	Главные углы в плане резцов	φ , град	см. рис. 2.4	
2	Толщина среза	a , мм	(1.7)	
Резец 1				
3	Глубина резания	t_1 , мм	$t_1 = (D_o - d_1) / 2$	
4	Ширина среза	b_1 , мм	(1.8)	
5	Скорость резания	v_1 , м/мин	(1.2)	
6	Угол резания	δ_1 , град	$\delta_1 = 90 - \gamma_1$	
7	Главная составляющая силы резания	P_{z1} , Н	см. формулу в задании	
8	Эффективная мощность резания	W_{z1} , Вт	(2.18)	
Резец 2				
9	Глубина резания	t_2 , мм	$t_2 = (d_1 - d_2) / 2$	
10	Ширина среза	b_2 , мм	(1.8)	
11	Скорость резания	v_2 , м/мин	(1.2)	
12	Угол резания	δ_2 , град	$\delta_2 = 90 - \gamma_2$	
13	Главная составляющая силы резания	P_{z2} , Н	см. формулу в задании	
14	Эффективная мощность резания	W_{z2} , Вт	(2.18)	
Сверло				
15	Крутящий момент	M , Н · м	см. формулу в задании	
16	Эффективная мощность резания	W_{z3} , Вт	(2.19)	
Многоинструментальная наладка в целом				
17	Суммарная эффективная мощность резания	W_z , Вт	$W_z = W_{z1} + W_{z2} + + W_{z3}$	
18	Минимальная мощность двигателя привода главного движения	W , кВт	(2.17)	

Задание 2.2

При обработке легированной стали однолезвийным инструментом получены зависимости $P_z = 12000b^{0,9}a^{0,6}v^{-0,3}$ и $P_N = 750ts^{0,75}v^{-0,15}\delta^{0,95}$, где $a \times b$ – сечение среза, мм²; v – скорость резания, м/мин. Результат расчета сил – в ньютонах.

Пользуясь этими формулами, определите, какое наименьшее тяговое усилие должен развивать привод подачи горизонтально-фрезерного станка, чтобы обеспечить обработку заготовки из этой стали цилиндрической фрезой, имеющей 16 прямых зубьев.

Масса стола станка 100 кг, коэффициент трения скольжения стола по направляющим 0,1. Другие данные для расчета приведены в табл. 2.6–2.8.

Учтите, что наибольшая сила резания действует на фрезу в момент времени, когда ее очередной зуб выходит из контакта с заготовкой (при встречном фрезеровании) или входит в этот контакт (при попутном фрезеровании).

Получите у преподавателя трехзначный номер варианта задания.

Если сумма цифр номера варианта является четным числом – ведите расчет для встречного фрезерования, если нечетным числом – для попутного.

По первой цифре номера варианта возьмите данные из табл. 2.6, по второй – из табл. 2.7, по третьей – из табл. 2.8. Решение оформите в виде табл. 2.9.

Таблица 2.6

Диаметр фрезы, мм

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>D</i>	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70

Таблица 2.7

Частота вращения фрезы, об/мин

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>n</i>	300	280	260	240	220	200	180	160	140	120

Другие параметры операции

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость движения подачи v_s , мм/мин	300		350		400		450		500	
Глубина резания t , мм	10		9,5		9		8,5		8	
Ширина фрезерования B , мм	80		75		70		65		60	

Таблица 2.9

Оформление решения задания 2.2

№ п/п	Рассчитываемая величина	Обозначение, размерность	Формула или номер формулы	Результат расчета
1	Угол контакта зуба фрезы с заготовкой	τ , град	(1.13)	
2	Угол между зубьями фрезы	ε_z , град	$\varepsilon_z = 360 / z$	
3	Число одновременно работающих зубьев	q	(1.11)	
4	Углы поворота зубьев в момент снятия наибольшего среза	μ_i , град (i – номер зуба)	$\mu_i = \tau - \varepsilon_z(i - 1)$	
5	Подача на зуб фрезы	s_z , мм/зуб	(1.5)	
6	Мгновенная толщина среза на i -м работающем зубе	a_{zi} , мм	(1.12)	
7	Ширина среза	b , мм	$b = B / \cos \omega$	
8	Скорость резания	v , м/мин	(1.3)	
9	Главная составляющая силы резания на i -м зубе	P_{zi} , Н	см. формулу в задании	
10	Нормальная составляющая силы резания на i -м зубе	P_{Ni} , Н	см. формулу в задании	
11	Горизонтальная составляющая усилия фрезерования	P_H , Н	(2.12)	
12	Вертикальная составляющая усилия фрезерования	P_V , Н	(2.13)	
13	Вес (сила тяжести) стола станка	G , Н	$G = mg$	
14	Минимальная тяговая сила привода подачи станка	P_T , Н	(2.21)	

Глава 3. ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

Обозначения

В рисунках, пояснительном тексте, задачах, заданиях и решениях главы 3 использованы обозначения, приведенные в главах 1 и 2 и в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Обозначения и размерности некоторых величин

Наименование величины		Обозначение	Размерность
Машинное время		τ_m	мин
Время наладки инструмента		τ_n	
Минутная зарплата	станочника	E_c	руб/мин
	наладчика	E_n	
Накладные расходы		HP	%
Стоимость инструмента		Q	руб.
Затраты на одну заточку инструмента		q_3	
Количество заточек, допускаемое инструментом		i_3	—
Число граней многогранной режущей пластины		$i_{гр}$	
Показатель относительной стойкости		m	
Жесткость системы		j	Н/мм
Высота неровностей микропрофиля		Rz	мм
Радиус вершины режущего лезвия		r_b	

Элементы теории

При резании совокупное действие силовых и температурных факторов активизирует механическое истирание, адгезионные, диффузионные и другие процессы на контактных площадках инструмента, приводящие к изменению формы и размеров режущих лезвий.

Наиболее существенное формоизменение инструмента происходит при его изнашивании.

Изнашивание, как правило, сопровождается возникновением лунки глубиной $h_{\text{л}}$ на передней поверхности отдельного лезвия, площадки износа длиной l_2 на его задней поверхности и увеличением радиуса вершины лезвия (рис. 3.1).

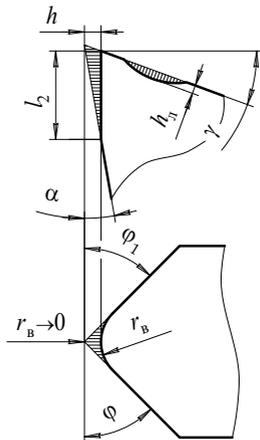


Рис. 3.1. Типичный вид изношенного лезвия

Основное влияние на работоспособность лезвия оказывает изнашивание задней поверхности. Прямо пропорционально увеличению длины l_2 возрастают радиальная составляющая силы резания, размерный износ лезвия

$$h = l_2 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \gamma}, \text{ мм} \quad (3.1)$$

и его относительный поверхностный износ

$$\tilde{h} = \frac{h}{A} \cdot 10^6, \text{ мм/м}^2, \quad (3.2)$$

где A – площадь поверхности, обработанной лезвием до его размерного износа h , мм^2 . При продольном точении $A = \pi dL$; при обработке отверстий осевым инструментом $A = \pi DL/z$; при цилиндрическом фрезеровании $A = BL/z$.

По достижении некоторой критической величины l_2 начинается катастрофическое изнашивание лезвия, и оно теряет свою работоспособность.

Промежуток времени T , в течение которого новое или восстановленное лезвие работает до отказа, называется периодом стойкости лезвия.

Величина T входит в так называемый закон стойкости (табл. 3.2), в котором значения коэффициента C_v и показателей степени m , x_v , y_v , q_v и др. зависят в первую очередь от физико-механических свойств инструментального и обрабатываемого материалов и вида обработки резанием.

Таблица 3.2

Закон стойкости для некоторых видов обработки резанием

Вид обработки резанием	Закон стойкости (v , м/мин)
Точение	$v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} s_o^{y_v}}$
Сверление	$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m s_o^{y_v}}$
Рассверливание, зенкерование, развертывание	$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m t^{x_v} s_o^{y_v}}$
Фрезерование	$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m t^{x_v} s_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}}$

Максимально допустимый в конкретных условиях обработки износ режущего инструмента зависит от выбранного критерия затупления.

При *экономическом критерии* затупления период стойкости инструмента (называемый экономическим периодом стойкости $T_{\text{ЭК}}$) определяют исходя из минимума себестоимости обработки резанием:

$$T_{\text{ЭК}} = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_2 + B_3}{B_1}, \text{ мин.} \quad (3.3)$$

Здесь

$$B_1 = k_o E_c \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб/мин;} \quad (3.4)$$

$$B_2 = \tau_n E_n \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб.} \quad (3.5)$$

В формуле (3.4) величина k_0 показывает, во сколько раз время операции, на которой применяется данный инструмент, больше машинного времени.

Комплекс B_3 для инструмента, допускающего заточку, имеет вид

$$B_3 = \frac{Q + q_3 i_3}{i_3 + 1}, \text{ руб.}, \quad (3.6)$$

а для инструмента со сменными многогранными пластинами

$$B_3 = \frac{Q}{i_{\text{тр}}}, \text{ руб.} \quad (3.7)$$

Полный период стойкости (срок службы) затачиваемого инструмента

$$I = (i_3 + 1)T, \text{ мин.}, \quad (3.8)$$

а инструмента со сменными пластинами

$$I = i_{\text{тр}} T, \text{ мин.} \quad (3.9)$$

Количество единиц инструмента (или сменных пластин), необходимое для обработки N одинаковых изделий:

$$K = \frac{N}{I} \tau_{\text{м}}, \text{ шт.}, \quad (3.10)$$

а затраты на инструмент, приходящиеся на одно изделие:

$$З = \frac{\tau_{\text{м}}}{T} B_3, \text{ руб./шт.} \quad (3.11)$$

Себестоимость собственно обработки резанием, не учитывающая амортизацию оборудования, стоимость заготовки и оснастки:

$$C = \tau_{\text{м}} \left(B_1 + \frac{B_2 + B_3}{T} \right), \text{ руб.} \quad (3.12)$$

В соответствии с *критерием точности обработки* замену инструмента следует производить, когда изменение Δ размера обрабатываемой поверхности, возникающее из-за изнашивания инструмента, превышает предельно допустимую величину.

При точении изменение диаметра обработанной поверхности, связанное с изнашиванием инструмента:

$$\Delta = 2(h + \delta_p), \text{ мм.} \quad (3.13)$$

Отжатие инструмента из-за возрастания радиальной составляющей силы резания

$$\delta_p = \frac{N_2}{j} \cos \varphi, \text{ мм.} \quad (3.14)$$

Силу, действующую по нормали к задней поверхности режущего лезвия, находят экспериментально или рассчитывают по формуле

$$N_2 \approx 0,25bl_2\sigma_{-B}, \text{ Н,} \quad (3.15)$$

где σ_{-B} – предел прочности обрабатываемого материала при сжатии, МПа.

В соответствии с *критерием шероховатости поверхности* замену инструмента следует производить, когда высота неровностей микропрофиля обработанной поверхности перестает соответствовать требуемой.

При работе острозаточенным резцом ($r_B \rightarrow 0$)

$$Rz = s_o \frac{\text{tg } \varphi \cdot \text{tg } \varphi_1}{\text{tg } \varphi + \text{tg } \varphi_1}, \text{ мм,} \quad (3.16)$$

а при работе резцом, у которого $r_B \geq s_o$:

$$Rz \approx \frac{s_o^2}{8r_B}, \text{ мм.} \quad (3.17)$$

Как видно из (3.17), с увеличением радиуса вершины значение Rz снижается, что в ряде случаев недопустимо.

Под действием высоких температур и давлений в процессе резания может происходить пластическое деформирование лезвия с изменением его первоначальной геометрии (рис. 3.2).

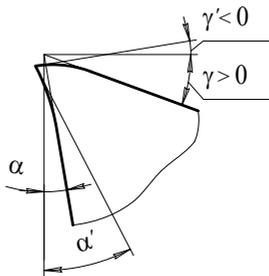


Рис. 3.2. Деформирование режущего лезвия

Это явление выражено тем сильнее, чем ниже *запас пластической прочности* инструмента:

$$n_T = \frac{20H_R}{\sqrt{\sigma_B^2 + 3,16f_1^2}}. \quad (3.18)$$

Здесь H_R — твердость материала режущей части инструмента, МПа; f_1 — удельная сила трения на передней поверхности отдельного лезвия, МПа.

Если пренебречь силами на задней поверхности лезвия, то

$$f_1 = \frac{P_z \sin \gamma + P_N \cos \gamma}{bl_1}, \text{ МПа.} \quad (3.19)$$

Примеры решения задач

Задача 3а. Цилиндрическая фреза диаметром 100 мм имеет 10 зубьев и работает с глубиной резания 8 мм. Производительность процесса резания при фрезеровании 62 см³/мин, а скорость подачи инструмента 120 мм/мин.

Период стойкости фрезы составляет 30 мин, по истечении которых отдельный зуб имеет площадку износа на задней поверхности 0,8 мм.

Каков относительный поверхностный износ зуба фрезы на момент отказа инструмента, если передний угол зубьев 10°, а задний угол 8°?

Решение

Подставляя в (3.2) соотношение (3.1) и формулу площади поверхности, обработанной отдельным зубом фрезы, получаем выражение

$$\tilde{h} = \frac{z l_2}{BL} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma} \cdot 10^6, \text{ мм/м}^2, \quad (3.20)$$

в котором нам неизвестны ширина фрезерования B и длина обработанной поверхности L .

Величину B найдем из формулы (1.21), которая с учетом (1.3) и (1.4) принимает вид

$$\Pi = \frac{tv_s B}{1000}, \text{ см}^3/\text{мин.}$$

Тогда

$$B = \frac{1000\Pi}{tv_s}, \text{ мм.} \quad (3.21)$$

Для отыскания длины обработанной поверхности используем выражение (1.22), подставив в него величину врезания из табл. 1.2:

$$L = v_s \tau_m - \sqrt{Dt - t^2}, \text{ мм.} \quad (3.22)$$

Поскольку фреза работала до отказа, то $\tau_m = T$. Учитывая это обстоятельство и подставляя (3.21) и (3.22) в (3.20), окончательно получаем

$$\tilde{h} = \frac{1000zl_2}{\Pi} \cdot \frac{tv_s}{v_s T - \sqrt{Dt - t^2}} \cdot \frac{\text{tg } \alpha}{1 - \text{tg } \alpha \cdot \text{tg } \gamma}, \text{ мм/м}^2,$$

откуда находим, что $\tilde{h} = 5 \text{ мм/м}^2$.

Задача 3б. При рассверливании отверстия диаметром 9 мм до диаметра 18 мм минутная зарплата станочника составляет 10 руб., операционное время на 20 % больше машинного, а накладные расходы 100 %. Наладчик на этой операции не требуется.

Сверло стоит 780 руб. и выдерживает 9 заточек, затраты на каждую из которых 20 руб., а закон стойкости для этой операции имеет вид

$$v = \frac{11D^{0,4}}{T^{0,16} t^{0,2} s_o^{0,45}}, \text{ м/мин.}$$

Какую скорость подачи следует придать сверлу, чтобы при частоте вращения 460 об/мин его период стойкости был экономически целесообразным?

Решение

Скорость подачи при заданной частоте вращения инструмента рассчитаем с помощью (1.4), определив величину подачи на один оборот сверла.

Из приведенного в условии задачи закона стойкости находим, что

$$s_o = \left(\frac{C_v D^{u_v}}{T^m t^{x_v} v} \right)^{1/y_v}, \text{ мм/об,}$$

или, с учетом (1.3),

$$s_o = \left(\frac{1000C_v}{\pi} \cdot \frac{D^{u_v-1}}{T^m t^{x_v} n} \right)^{1/y_v}, \text{ мм/об.} \quad (3.23)$$

Глубина резания при рассверливании $t = (D - D_o) / 2 = 4,5$ мм, следовательно, в выражении (3.23) нам неизвестен только период стойкости инструмента.

По условию задачи период стойкости сверла должен быть экономически целесообразным. Рассчитаем значение $T_{\text{эк}}$.

По формуле (3.4) при $E_c = 10$ и $k_o = 1,2$ получаем, что $B_1 = 24$ руб/мин.

Поскольку наладчик на этой операции не требуется, $B_2 = 0$.

По формуле (3.6) при $Q = 780$, $q_3 = 20$ и $i_3 = 9$ находим, что $B_3 = 96$ руб.

Из закона стойкости, приведенного в условии задачи, видно, что $m = 0,16$. Тогда из (3.3) получаем, что $T_{\text{эк}} = 21$ мин.

Подставив найденное значение $T_{\text{эк}}$ в выражение (3.23), а его, в свою очередь, в формулу (1.4), окончательно имеем:

$$v_s = n^{1-1/y_v} \left(\frac{1000C_v}{\pi} \cdot \frac{D^{u_v-1}}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v}} \right)^{1/y_v}, \text{ мм/мин.} \quad (3.24)$$

Расчет по формуле (3.24) показывает, что $v_s = 154$ мм/мин.

Задача 3в. Быстрорежущим резцом, твердость которого 60 МПа, производится отрезка заготовок из стали с пределом прочности 700 МПа. Резец имеет передний угол 10° и работает с подачей 0,13 мм/об.

Каков запас пластической прочности режущего клина, если на этой операции длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента 1,2 мм, коэффициент утолщения стружки 1,5, а силами, действующими на задней поверхности резца, можно пренебречь?

Решение

Чтобы рассчитать запас пластической прочности по формуле (3.18), нам не хватает только значения удельной силы трения на передней поверхности резца.

Величина f_1 описывается зависимостью (3.19), в которую входят главная составляющая силы резания и сила, действующая по нор-

мали к главной режущей кромке. В случае, когда можно пренебречь силами на задней поверхности инструмента, значения P_z и P_N определяются выражениями (2.10) и (2.11).

Подставим (2.10) и (2.11) в (3.19) и после несложных преобразований, учитывая, что при отрезке $\varphi = 90^\circ$, то есть $a = s_o$, получим

$$f_1 = 0,9s_o\sigma_B \frac{K_a(\operatorname{tg} \gamma + 1) - \sec \gamma}{l_1}, \text{ МПа.} \quad (3.25)$$

Рассчитав значение f_1 по формуле (3.25), а затем запас пластической прочности по формуле (3.18), находим, что $n_T = 1,7$.

Задачи

3.01. Режущее лезвие работает с углом резания 80° и имеет задний угол в два раза меньше переднего.

Какая площадка износа образовалась на задней поверхности лезвия, если его размерный износ достиг $0,08$ мм?

3.02. На станок установлен резец с передним углом 18° и задним углом 10° , имеющий площадку износа на задней поверхности $0,2$ мм.

Какова будет длина этой площадки после того, как в процессе работы резец приобретет размерный износ $0,15$ мм?

3.03. Режущее лезвие имеет передний угол 11° .

Каким должен быть задний угол лезвия, чтобы его размерный износ составлял не более 12% от длины площадки износа по задней поверхности?

3.04. При продольной обточке четырех заготовок диаметром 61 мм и длиной 75 мм размерный износ резца составил $0,1$ мм.

Каков относительный поверхностный износ инструмента, если он работал с глубиной резания 4 мм?

3.05. При сверлении отверстия глубиной 100 мм со скоростью резания 24 м/мин размерный износ отдельного лезвия инструмента составил $0,12$ мм.

Каков относительный поверхностный износ лезвия, если частота вращения сверла 200 об/мин?

3.06. Сверло диаметром 24 мм имеет угол заборного конуса 120° и работает со скоростью подачи 255 мм/мин. Машинное время сверления одного отверстия 30 секунд.

Каков размерный износ отдельного лезвия инструмента после обработки отверстия, если его относительный поверхностный износ 11 мм/м²?

3.07. Для некоторой операции обработки резанием экспериментально получено, что $v \sim \frac{1}{\sqrt[5]{T}}$. В какую сторону и насколько (в процентах) следует изменить скорость резания на этой операции, чтобы повысить период стойкости инструмента в 2 раза?

3.08. В законе стойкости при сверлении (см. табл. 3.2) $C_v = 9,7$; $y_v = 0,5$; $q_v = 0,4$; $m = 0,2$. Какой производительности процесса резания можно достичь при обработке отверстия диаметром 15 мм с подачей 0,4 мм/об, если период стойкости сверла 24 мин?

3.09. Какой период стойкости инструмента обеспечивается в условиях задачи 3.08 при работе со скоростью подачи 183 мм/мин?

3.10. Эксперимент показал, что в законе стойкости при зенкеровании (см. табл. 3.2) $C_v = 69$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,45$; $q_v = 0,4$; $m = 0,4$.

Какую подачу на зуб должен иметь трехзубый зенкер диаметром 20 мм, чтобы при скорости резания 50 м/мин и суммарном сечении среза 3,6 мм² период стойкости инструмента составлял 30 мин?

3.11. Зенкер диаметром 32 мм, работая со скоростью резания 56 м/мин и скоростью движения подачи 400 мм/мин, имеет период стойкости 40 мин.

Каков диаметр отверстия под зенкерование, если закон стойкости на этой операции описывается тем же выражением, что и в задаче 3.10?

3.12. В законе стойкости при цилиндрическом фрезеровании (см. табл. 3.2) $C_v = 35,4$; $x_v = 0,3$; $y_v = 0,4$; $q_v = 0,45$; $u_v = p_v = 0,1$; $m = 0,33$.

Фреза диаметром 90 мм имеет 10 зубьев и работает с подачей 2 мм/об. Угол контакта зубьев фрезы с заготовкой 21° , ширина фрезерования 57 мм.

С какой скоростью резания должна работать фреза, чтобы ее период стойкости составлял 120 мин?

3.13. На токарном станке обрабатывают «напроход» заготовку диаметром 75 мм и длиной 98 мм резцом с квадратной сменной пластиной, имеющей главный угол в плане 45° . Скорость резания при точении 50 м/мин, подача 0,5 мм/об, глубина резания 4 мм. Время операции (с учетом вспомогательного) 1,4 мин, показатель относительной стойкости 0,2.

Стоимость пластины 315 руб., минутная зарплата токаря 5 руб., накладные расходы 80 %, наладчик на этой операции не требуется.

Каков экономический период стойкости отдельной грани пластины?

3.14. Сколько сменных пластин потребуется для обработки 1000 заготовок в условиях задачи 3.13, если каждая грань пластины будет работать с экономическим периодом стойкости?

3.15. Ступень диаметром 80 мм на заготовке диаметром 90 мм протачивают с подачей 0,8 мм/об резцом, который оснащен шестигранной сменной пластиной стоимостью 378 руб. Минутная зарплата токаря 3 руб., накладные расходы 75 %, время операции в 1,2 раза больше машинного, наладчик на этой операции не требуется.

При какой частоте вращения заготовки период стойкости отдельной грани режущей пластины будет равен экономическому, если в законе стойкости (см. табл. 3.2) $C_v = 215$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,25$; $m = 0,2$?

3.16. Какова себестоимость обработки резанием в условиях задачи 3.15, если длина обтачиваемой ступени 150 мм, а вспомогательный угол в плане режущей пластины 5° ?

3.17. Для сквозной расточки кольца (рис. 3.3) используют резец с четырехгранной сменной пластиной стоимостью 300 руб. При скорости резания 71 м/мин и подаче 0,54 мм/об каждая грань пластины работает до отказа 20 мин.

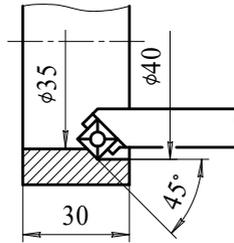


Рис. 3.3. К задаче 3.17

Предлагается заменить резец четырехзубым зенкером с углом заборного конуса 120° , который имеет период стойкости 40 мин при скорости резания 44 м/мин и подаче 0,25 мм/зуб. Стоимость зенкера 1160 руб., он может выдержать 10 заточек, затраты на каждую из которых составляют 80 руб.

Целесообразно ли заменить резец зенкером с точки зрения затрат на инструмент, приходящихся на одно изделие?

3.18. Сколько режущих пластин и сколько зенкеров потребуется в условиях задачи 3.17 для обработки 9750 одинаковых колец?

3.19. Сверло диаметром 16 мм работает с подачей 0,25 мм/об и имеет угол заборного конуса 116° . Стоимость сверла 1800 руб., оно выдерживает 20 заточек, расходы на каждую из которых составляют 15 руб.

Минута работы станочника стоит 8 руб., наладчик на данной операции не требуется, операционное время в 1,25 раза больше машинного, накладные расходы 100 %.

Экспериментальным путем для этой операции получена зависимость

$$v = \frac{12D^{0,4}}{T^{0,2} S_o^{0,5}}, \text{ м/мин.}$$

Какое количество сверл потребуется для обработки 7000 сквозных отверстий длиной 55 мм, если замену инструмента производить в соответствии с экономическим критерием затупления?

3.20. Сколько сверл потребуется в условиях задачи 3.19 для обработки такого же количества отверстий, если применить инструмент с износостойким покрытием, которое увеличит стоимость сверла на 700 руб.?

3.21. Себестоимость обработки резанием при сверлении отверстия диаметром 20 мм и глубиной 70 мм составляет 20 руб/шт.

Сверло имеет угол заборного конуса 118° , работает со скоростью подачи 112 мм/мин, стоит 1000 руб. и выдерживает 12 заточек, стоимость каждой из которых 25 руб.

Минутная зарплата станочника 10 руб., операционное время больше машинного в 1,4 раза, накладные расходы 85 %, наладчик на этой операции не требуется.

Каков период стойкости инструмента?

3.22. В заготовке сверлят отверстие диаметром 24 мм и глубиной 80 мм инструментом с углом заборного конуса 120° при подаче 0,4 мм/об и скорости резания 37,7 м/мин.

Каков полный период стойкости (срок службы) сверла, если его можно затачивать 14 раз, а время работы сверла до отказа в 46 раз больше машинного времени операции?

3.23. В законе стойкости при сверлении (табл. 3.2) $C_v = 9$; $y_v = 0,5$; $q_v = 0,4$; $m = 0,2$. Сверло диаметром 8 мм работает с подачей 0,25 мм/зуб, стоимость сверла 1200 руб., оно выдерживает 15 заточек, расходы на каждую из которых составляют 28 руб.

Минутная зарплата станочника 5 руб., наладчик на данной операции не требуется, операционное время в 1,2 раза больше машинного, накладные расходы 70 %.

С какой скоростью резания следует сверлить отверстие, чтобы период стойкости инструмента был экономически целесообразным?

3.24. Стальную заготовку обрабатывают цилиндрической фрезой с десятью зубьями при глубине резания 5 мм, подаче 0,12 мм/зуб и скорости резания 33 м/мин. Длина обрабатываемой поверхности 124 мм, угол контакта при фрезеровании 25° .

Каков период стойкости фрезы, если затраты на инструмент, приходящиеся на одно изделие, составляют 12 руб/шт, фреза

стоит 3000 руб. и выдерживает 12 заточек, расходы на каждую из которых 70 руб.?

3.25. При обработке заготовок шириной 80 мм и длиной 132 мм цилиндрической фрезой диаметром 100 мм, которая имеет 20 зубьев, глубина резания составляет 6 мм, скорость резания 31,4 м/мин, а скорость подачи инструмента 300 мм/мин.

В законе стойкости для этой операции (табл. 3.2) $C_v = 35,3$; $x_v = 0,3$; $y_v = 0,4$; $q_v = 0,45$; $u_v = p_v = 0,1$; $m = 0,33$.

Сколько фрез понадобится для обработки 11 000 заготовок, если каждая фреза допускает 8 заточек?

3.26. Каковы затраты на инструмент при обработке всех заготовок в условиях задачи 3.25, если фреза стоит 3650 руб., а расходы на каждую ее заточку составляют 95 руб.?

3.27. Себестоимость обработки резанием составляет 15 руб/шт при машинном времени 30 с и периоде стойкости инструмента 60 мин.

Инструмент выдерживает 10 заточек, затраты на каждую из которых 60 руб. Наладчик на данной операции не требуется, а показатель относительной стойкости 0,25.

Сколько стоит инструмент, если его экономический период стойкости 40 мин?

3.28. Закон стойкости для операции фрезерования имеет вид

$$v = \frac{35,4D^{0,45}}{T^{0,33}t^{0,3}s_z^{0,4}(Bz)^{0,1}}, \text{ м/мин.}$$

Цилиндрическая фреза стоимостью 4400 руб. допускает 9 заточек, расходы на каждую из которых 95 руб.

Минутная зарплата фрезеровщика 10 руб., а наладчика 40 руб. Операционное время обработки одного изделия в 1,2 раза больше машинного, время подналадки станка при замене инструмента 6 мин, накладные расходы составляют 80 %.

Каков экономический период стойкости инструмента?

3.29. Какова в условиях задачи 3.28 себестоимость обработки резанием заготовки шириной 50 мм и длиной 148 мм при экономически целесообразном периоде стойкости инструмента, если фреза диаметром 80 мм имеет десять зубьев и работает с глубиной резания 4 мм и подачей 0,17 мм/зуб?

3.30. При продольном точении участка заготовки длиной 85 мм экономически целесообразно менять грани квадратной сменной пластины каждые 20 мин, хотя время работы грани до отказа на 50 % больше.

Резец, оснащенный этой пластиной, работает со скоростью подачи 150 мм/мин, глубиной резания 5 мм и имеет главный угол в плане 45°. Наладчик на этой операции не требуется, а показатель относительной стойкости равен 0,2.

Сколько стоит пластина, если себестоимость операции при полном использовании стойкостного ресурса пластины 14 руб/шт?

3.31. При продольном точении заготовки с глубиной резания 2 мм к моменту времени, когда размерный износ резца достиг 0,1 мм, удельная нормальная сила на его задней поверхности составила 500 МПа.

Насколько возросла (по сравнению с началом обработки, когда инструмент практически не имел износа) радиальная составляющая силы резания, если передний угол инструмента 18°, задний 6°, а главный угол в плане 50°?

3.32. Насколько изменился диаметр обработанной поверхности в условиях задачи 3.31, если жесткость системы «резец – заготовка» 15,5 кН/мм?

3.33. К концу рабочего хода при продольной обточке заготовки диаметром 65 мм и длиной 90 мм отжатие инструмента, связанное с возрастанием радиальной составляющей силы резания, достигает 0,05 мм.

Резец работает с шириной среза 4 мм, углом резания 100°, задним углом 8° и главным углом в плане 90°. Предел прочности при сжатии материала заготовки 1200 МПа, жесткость системы «резец – заготовка» 14100 Н/мм.

Каков относительный поверхностный износ инструмента в конце его рабочего хода?

3.34. Относительный поверхностный износ резца при продольном точении заготовки диаметром 76 мм и длиной 120 мм составляет 2 мм/м².

Передний угол резца 12°, задний угол 6°, главный угол в плане 55°. Предел прочности при сжатии обрабатываемого материала 1100 МПа, жесткость системы «резец – заготовка» 17 кН/мм.

Насколько изменится диаметр обработанной поверхности к концу рабочего хода инструмента, если глубина резания при точении 5 мм?

3.35. При продольном точении цилиндрической заготовки диаметром 100 мм острозаточенный резец с главным углом в плане 45° и вспомогательным углом в плане 10° снимает срез сечением 5 мм².

Какова высота микронеровностей обработанной поверхности, рассчитанная из геометрических соображений, если скорость главного движения у вершины резца на 10 % меньше, чем скорость резания?

3.36. При продольном точении заготовки диаметром 39 мм применяется острозаточенный резец с главным углом в плане 60° и вспомогательным 20°.

Какую наибольшую скорость подачи можно придать инструменту, чтобы при скорости резания 49 м/мин высота микронеровностей на обработанной поверхности не превышала 0,1 мм?

3.37. Насколько можно увеличить скорость подачи инструмента в условиях задачи 3.36, если использовать резец с радиусом вершины 0,5 мм?

3.38. На токарном станке с числовым программным управлением обрабатывают за один проход заготовку, которая имеет цилиндрическую и коническую поверхности.

Острозаточенный резец с главным углом в плане 45° работает с подачей 0,2 мм/об и при точении цилиндрического участка заготовки оставляет на обработанной поверхности микронеровности высотой 100 мкм.

Какой будет высота микронеровностей при обработке конического участка заготовки с углом 60° при вершине конуса?

3.39. Острозаточенный проходной токарный резец оснащен квадратной сменной пластиной и работает с подачей $0,32$ мм/об.

Какой вспомогательный угол в плане следует придать инструменту, чтобы высота микронеровностей обработанной поверхности, рассчитанная из геометрических соображений, составляла 80 мкм, а главный угол в плане был больше вспомогательного?

3.40. При продольном точении цилиндрической заготовки с глубиной резания 5 мм скорость резания составляет 80 м/мин.

Какой радиус следует придать вершине проходного резца, чтобы при производительности процесса резания 160 см³/мин обеспечить высоту микронеровностей обработанной поверхности не более 20 мкм?

3.41. Заготовку диаметром 93 мм обтачивают проходным резцом, снимая припуск 9 мм на диаметр.

Для этой операции экспериментально получена зависимость

$$v = \frac{177}{T^{0,2} t^{0,15} s_0^{0,35}}, \text{ м/мин.}$$

Высота микронеровностей обработанной поверхности, рассчитанная из геометрических соображений, не должна превышать $0,1$ мм.

Какой радиус следует придать вершине резца, чтобы обеспечить эту высоту микронеровностей, если при частоте вращения заготовки 250 об/мин период стойкости инструмента должен быть не менее 40 мин?

3.42. Острозаточенным резцом с главным углом в плане 45° и вспомогательным 10° обрабатывают «напроход» цилиндрическую поверхность диаметром 120 мм и длиной 175 мм при глубине резания $2,5$ мм.

Исследования показали, что для этой операции

$$P_z = 3800ba^{0,75}v^{-0,15}, \text{ Н.}$$

Каково машинное время операции, если известно, что высота микронеровностей обработанной поверхности не превышает 60 мкм, а эффективная мощность процесса резания 4 кВт?

3.43. При продольном точении заготовки применяют острозаточенный резец с главным углом в плане 45° и вспомогательным углом в плане 20° , работающий с подачей 0,3 мм/об.

Закон стойкости для этой операции имеет вид

$$v = \frac{70}{T^{0,2} t^{0,15} s_0^{0,45}}, \text{ м/мин.}$$

Насколько (в процентах) можно увеличить скорость подачи инструмента, если заменить этот резец резцом с радиусом вершины 1 мм, добившись при этом, чтобы высота микронеровностей обработанной поверхности, рассчитанная из геометрических соображений, осталась прежней, а период стойкости инструмента возрос на 25 %?

3.44. Резцом со сменной пластиной твердостью 85 МПа обтачивают заготовку из конструкционной стали, предел прочности которой 610 МПа.

Передний угол реза 0° , подача 0,2 мм/об, скорость резания 100 м/мин.

Известно, что при точении этой стали

$$P_x = 2860 t s_0^{0,5} v^{-0,4}, \text{ Н.}$$

Каков запас пластической прочности режущего клина, если длина контактной площадки между стружкой и передней поверхностью резца составляет 1,2 мм, а силами, действующими на задней поверхности инструмента, можно пренебречь?

3.45. Резцом из быстрорежущей стали, твердость которой в закаленном состоянии 60 МПа, производится отрезка заготовок из легированной стали, имеющей предел прочности 640 МПа.

Измерения показали, что при ширине резца 4 мм и угле резания 75° главная составляющая силы резания равна 2050 Н, радиальная 1000 Н, а длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента 1 мм.

Каков запас пластической прочности режущего клина, если силами, действующими на задней поверхности инструмента, можно пренебречь?

3.46. При точении заготовки из стали с пределом прочности 550 МПа экспериментально получено, что $P_x = 0,7$ кН, $P_y = 1$ кН, $P_z = 3$ кН.

Резец со сменной пластиной твердостью 90 МПа работает с глубиной резания 3 мм и имеет передний угол 15° .

Каков запас пластической прочности режущего клина, если длина контакта стружки с передней поверхностью резца 1,3 мм, а силами, действующими на задней поверхности инструмента, можно пренебречь?

3.47. При каком переднем угле резца запас пластической прочности режущего клина в условиях задачи 3.46 возрастет до 2,8?

3.48. Измерения показали, что при продольном точении заготовки резцом с передним углом 5° $P_z = 2,5$ кН, $P_N = 1$ кН, длина контактной площадки на передней поверхности резца 1 мм, а коэффициент утолщения стружки 1,4.

Резец из быстрорежущей стали, твердость которого 64 МПа, имеет главный и вспомогательный углы в плане по 45° и снимает срез сечением 2 мм².

Каков запас пластической прочности режущего клина, если высота микронеровностей обработанной поверхности составляет 0,2 мм, а силами, действующими на задней поверхности инструмента, можно пренебречь?

3.49. Насколько и в какую сторону изменится запас пластической прочности режущего клина, если в условиях задачи 3.48 для снижения высоты микронеровностей обработанной поверхности до 0,1 мм применить инструмент с радиусом вершины 0,8 мм?

3.50. Резцом с квадратной сменной пластиной твердостью 80 МПа обтачивают заготовку из материала, предел прочности которого 670 МПа.

Передний угол резца 0° , скорость резания 50,4 м/мин, подача 0,5 мм/об.

Стоимость пластины 280 руб., минутная зарплата токаря 5 руб., накладные расходы 100 %, время операции в 1,4 раза больше машинного, наладчик на этой операции не требуется.

В законе стойкости (табл. 3.2) $C_v = 95$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,25$; $m = 0,2$.

Каков запас пластической прочности режущего клина при экономическом периоде стойкости инструмента, если длина контакта стружки с резцом 1,5 мм, осевая составляющая силы резания 1500 Н, а силами, действующими на задней поверхности инструмента, можно пренебречь?

Задания

Задание 3.1

При продольном точении заготовки из стали 20, имеющей предел прочности на сжатие 800 МПа, используется резец с главным углом в плане 45° , передним углом 15° и задним углом 6° . Резец оснащен пятигранной сменной пластиной из твердого сплава Т15К6, стоимость которой 100 руб.

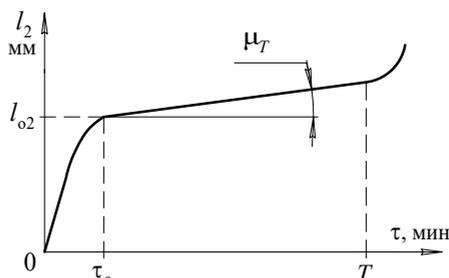


Рис. 3.4. К заданию 3.1

На стадии регулярного изнашивания $\tau \in [\tau_0; T]$ (рис. 3.4) длина площадки износа на задней поверхности отдельной грани пластины связана со временем обработки τ зависимостью

$$l_2(\tau) = l_{02} + (\tau - \tau_0) \operatorname{tg} \mu_T, \text{ мм.}$$

Экспериментально определено, что для данной операции $\mu_T = 1^\circ$, период приработки отдельной грани пластины $\tau_0 = 0,5$ мин,

а площадка износа по задней поверхности грани после приработки $l_{o2} = 0,1$ мм.

Жесткость системы «резец – заготовка» 5 кН/мм. Время операции превышает машинное время на 20 %.

Оцените, насколько из-за изнашивания резца изменится диаметр обработанной поверхности к моменту времени, который соответствует экономическому периоду стойкости инструмента.

Получите у преподавателя трехзначный номер варианта задания.

По первой цифре номера варианта возьмите данные из табл. 3.3, по второй – из табл. 3.4, по третьей – из табл. 3.5. Решение оформите в виде табл. 3.6.

Таблица 3.3

Показатель относительной стойкости

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
d_2	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70

Таблица 3.4

Время наладки операции, мин

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
τ_n	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2

Таблица 3.5

Другие параметры операции

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Глубина резания t , мм		4		3,5		3		2,5		2	
Минутная зарплата, руб/мин	станочника E_c	10					15				
	наладчика E_n	25	30	35	40	45					
Накладные расходы HP , %		100					80				

Оформление решения задания 3.1

№ п/п	Рассчитываемая величина	Обозначение, размерность	Формула или номер формулы	Результат расчета
1	Комплекс, связанный с оплатой станочника	B_1 , руб/мин	(3.4)	
2	Комплекс, связанный с оплатой наладчика	B_2 , руб.	(3.5)	
3	Комплекс, связанный с затратами на инструмент	B_3 , руб.	(3.7)	
4	Экономический период стойкости	$T_{эк}$, мин	(3.3)	
5	Длина площадки износа к моменту времени $\tau = T_{эк}$	l_2 , мм	см. формулу в задании	
6	Размерный износ лезвия	h , мм	(3.1)	
7	Ширина среза при точении	b , мм	(1.8)	
8	Нормальная сила на задней поверхности резца	N_2 , Н	(3.15)	
9	Отжатие инструмента	δ_p , мм	(3.14)	
10	Изменение диаметра обработанной поверхности	Δ , мм	(3.13)	

Задание 3.2

При продольном точении цилиндрической заготовки применяют острозаточенный резец с главным углом в плане φ и вспомогательным углом в плане φ_1 , который работает с глубиной резания t и подачей s_0 .

Закон стойкости для этой операции имеет вид

$$v = \frac{140}{T^{0,2} t^{0,15} s_0^{0,45}}, \text{ м/мин.}$$

Поступило предложение изменить геометрию резца, скруглив его вершину радиусом r_b . Дайте заключение, имеет ли смысл такое изменение с точки зрения производительности процесса резания.

Высота микронеровностей обработанной поверхности (рассчитанная из геометрических соображений) при работе острозато-

ченным и радиусным резами должна быть одинаковой, а период стойкости инструментов старой и новой геометрии должен быть не менее T_{\min} .

Необходимые для анализа данные приведены в табл. 3.7–3.9.

Получите у преподавателя трехзначный номер варианта задания.

По первой цифре номера варианта возьмите данные из табл. 3.7, по второй – из табл. 3.8, по третьей – из табл. 3.9. Решение оформите в виде табл. 3.10.

Таблица 3.7

Радиус скругления вершины реза, мм

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r_B	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2

Таблица 3.8

Минимально допустимый период стойкости резцов, мин

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{\min}	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45

Таблица 3.9

Другие параметры операции

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s_o , мм/об		0,4		0,5		0,6		0,7		0,8	
t , мм		3			4			5		6	
Углы в плане, град	φ	40			50			60			
	φ_1	15					20				

Оформление решения задания 3.2

№ п/п	Рассчитываемая величина	Обозначение, размерность	Формула или номер формулы	Результат расчета
Острозаточенный резец				
1	Высота микронеровностей обработанной поверхности	R_z , мм	(3.16)	
2	Скорость резания	v , м/мин	см. формулу в задании	
3	Производительность процесса резания	P , см ³ /мин	(1.20)	
Резец с радиусной вершиной				
4	Подача	s_{or} , мм/об	(3.17)	
5	Скорость резания	v_r , м/мин	см. формулу в задании	
6	Производительность процесса резания	P_r , см ³ /мин	(1.20)	
Вывод:*				

* Возможные варианты вывода:

- 1) $P > P_r$, поэтому замена острозаточенного резца радиусным не имеет смысла;
- 2) $P_r > P$, поэтому замена острозаточенного резца радиусным целесообразна.

Глава 4. ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

К главе 1

1.01

$$a = \frac{f}{b} = s_o \sin \varphi \Rightarrow \varphi = \arcsin \frac{f}{bs_o}, \text{ град.}$$

1.02

$$\varphi_1 = 180^\circ - \varphi - \varepsilon_i \text{ (рис. 4.1);}$$

$$\varepsilon_i = 180 \left(1 - \frac{2}{i_{\text{тр}}} \right), \text{ град.}$$

$$a = \frac{f}{b}, \text{ мм; } \varphi = \arcsin \frac{a}{s_o}, \text{ град.}$$

$$\varphi_1 = \frac{360}{i_{\text{тр}}} - \arcsin \frac{f}{bs_o}, \text{ град.}$$

1.03

$$t = b \sin \varphi, \text{ мм.}$$

$$d = D_o - 2t = D_o - 2b \sin \varphi, \text{ мм.}$$

(рис. 4.2) \Rightarrow

$$n = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{v_d}{D_o - 2b \sin \varphi}, \text{ об/мин.}$$

$$v_s = ns_o = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{v_d a}{(D_o - 2b \sin \varphi) \sin \varphi}, \text{ мм/мин.}$$

1.04

$$k = 10\%; \quad \frac{\pi(D_o - 2t)n}{1000} = \frac{100 - k}{100} \cdot \frac{\pi D_o n}{1000} \Rightarrow t = \frac{k D_o}{200}, \text{ мм.}$$

$$\Pi = ts_o v = \frac{k D_o s_o}{200} \cdot \frac{\pi D_o n}{1000} = \frac{\pi k D_o^2}{2 \cdot 10^5} ns_o \Rightarrow v_s = ns_o = \frac{2 \cdot 10^5}{\pi} \cdot \frac{\Pi}{k D_o^2}, \text{ мм/мин.}$$

1.05

$$s_o = s_z z, \text{ мм/об; } n = \frac{1000 v}{\pi D}, \text{ об/мин; } v_s = ns_o = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{s_z z}{D} v, \text{ мм/мин.}$$

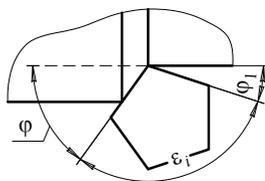


Рис. 4.1. К решению задачи 1.02

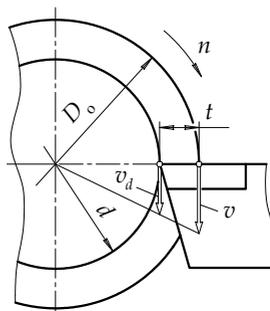


Рис. 4.2. К решению задачи 1.03

1.06

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; v_s = ns_z z = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{s_z z}{D} v, \text{ мм/мин.}$$

1.07

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; s_z = \frac{v_s}{nz} = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{v_s}{v} \cdot \frac{D}{z}, \text{ мм/зуб};$$

$$a_z = s_z \sin \varphi = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{v_s}{v} \cdot \frac{D}{z} \sin \varphi, \text{ мм.}$$

1.08

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; s_z = \frac{a_z}{\sin \varphi}, \text{ мм/зуб}; z = \frac{v_s}{ns_z} = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{v_s}{v} \cdot \frac{D}{a_z} \sin \varphi.$$

1.09

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; s_z = \frac{v_s}{nz} = \frac{\pi D}{2000} \cdot \frac{v_s}{v}, \text{ мм}; f_z = ts_z = \frac{\pi D^2}{4000} \cdot \frac{v_s}{v}, \text{ мм}^2.$$

1.10

$$s_o = \frac{f}{t} = \frac{2f}{D}, \text{ мм/об}; n = \frac{v_s}{s_o}, \text{ об/мин}; v = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{\pi}{2000} \cdot \frac{v_s D^2}{f}, \text{ м/мин.}$$

1.11

$$s_z = \frac{a_z}{\sin \varphi}, \text{ мм}; n = \frac{v_s}{s_z z}, \text{ об/мин}; v = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{\pi}{2000} \cdot \frac{v_s D}{a_z} \sin \varphi, \text{ м/мин.}$$

1.12

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; t = \frac{D-d}{2}, \text{ мм}; \sin \varphi = \frac{t}{b} = \frac{D-d}{2b};$$

$$s_z = \frac{a_z}{\sin \varphi} = \frac{2a_z b}{D-d}, \text{ мм/об}; v_s = ns_z z = \frac{4000}{\pi} \cdot \frac{a_z b}{D(D-d)} v, \text{ мм/мин.}$$

1.13

$$\Pi = ts_o v = \frac{D}{2} s_o \frac{\pi D n}{1000} = \frac{\pi s_o n}{2000} D^2 = \frac{\pi}{2000} v_s D^2 \Rightarrow D = 20 \sqrt{\frac{5\Pi}{\pi v_s}}, \text{ мм.}$$

1.14

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; v_s = ns_z z = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{s_z z}{D} v, \text{ мм/мин.}$$

1.15

$$t_{\text{окр}} = t_{\text{ос}} \operatorname{tg} \omega = \frac{\pi D}{z} \Rightarrow D = \frac{z t_{\text{ос}}}{\pi} \operatorname{tg} \omega, \text{ мм}; \quad v = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{z t_{\text{ос}} n}{1000} \operatorname{tg} \omega, \text{ м/мин.}$$

1.16

$$D = \frac{t_{\text{окр}} z}{\pi}, \text{ мм}; \quad n = \frac{1000 v}{\pi D} = 1000 \frac{v}{z t_{\text{окр}}}, \text{ об/мин}; \quad v_s = n s_z z = 1000 \frac{s_z v}{t_{\text{окр}}}, \text{ мм/мин.}$$

1.17

$$\Pi = t s_o v \frac{B}{\pi D} \Rightarrow t = \frac{\pi D}{s_o v B} \Pi = \frac{\pi D}{s_o B} \cdot \frac{1000}{\pi D n} \Pi = \frac{1000 \Pi}{v_s B}, \text{ мм.}$$

1.18

$$\Pi = t s_o v \frac{B}{\pi D} \Rightarrow t = \frac{\pi D}{s_o v B} \Pi = \frac{\pi D}{s_o B} \cdot \frac{1000}{\pi D n} \Pi = \frac{1000 \Pi}{v_s B}, \text{ мм};$$

$$\tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \Rightarrow D = \left(\frac{360}{\pi \tau} \right)^2 \frac{1000 \Pi}{v_s B}, \text{ мм.}$$

1.19

$$\tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad s_z = \frac{a_{z \max}}{\sin \tau}, \text{ мм/зуб}; \quad n = \frac{1000 v}{\pi D}, \text{ об/мин};$$

$$z = \frac{360}{\varepsilon_z}; \quad v_s = n s_z z, \text{ мм/мин.}$$

1.20

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \Rightarrow D = \frac{1000 v}{\pi n}, \text{ мм}; \quad q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right] = \left[\frac{z}{10} \sqrt{\frac{nt}{10\pi v}} + 1 \right].$$

1.21

$$q \in [2; 3); \quad 2 \leq \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 < 3 \Rightarrow \pi \sqrt{\frac{D}{t}} \leq z < 2\pi \sqrt{\frac{D}{t}}.$$

1.22

$$\tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad \varepsilon_z = \frac{360}{z_{\max}}; \quad f = B s_z (\sin \tau + \sin(\tau - \varepsilon_z)), \text{ мм}^2.$$

1.23

$$q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right] = 2; \quad \tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad \varepsilon_z = \frac{360}{z}; \quad f = B s_z (\sin \tau + \sin(\tau - \varepsilon_z)), \text{ мм}^2.$$

1.24

$$q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right]; \tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}; \varepsilon_z = \frac{360}{z}; \mu_1 = \tau; \mu_i = \tau - (i-1)\varepsilon_z;$$

$$s_z = \frac{v_s}{nz} = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{D}{z} \cdot \frac{v_s}{v}, \text{ мм/зуб};$$

$$f_{\max} = B s_z \sum_{i=1}^q \sin \mu_i = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{BD}{z} \cdot \frac{v_s}{v} (\sin \tau + \sin(\tau - \varepsilon_z) + \dots), \text{ мм}^2.$$

1.25

$$f_{\min} = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{BD}{z} \cdot \frac{v_s}{v} \sin \tau, \text{ мм}^2.$$

1.26

$$t_{\text{oc}} = \frac{\pi D}{z} \text{ctg } \omega, \text{ мм}; \quad \frac{m_3}{k} \approx \frac{t_{\text{oc}}}{H} = \frac{\pi D}{zH} \text{ctg } \omega.$$

1.27

$$t_{\text{oc}} = \frac{\pi D}{z} \text{ctg } \omega = \frac{360}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon_z}{\tau^2} t \text{ctg } \omega, \text{ мм}; \quad \frac{m_3}{k} = \frac{t_{\text{oc}}}{H}.$$

1.28

$$t_{\text{oc1}} = H = \frac{\pi D_1}{z} \text{ctg } \omega, \text{ мм}; \quad t_{\text{oc2}} = \frac{\pi D_2}{z} \text{ctg } \omega = \frac{D_2}{D_1} H, \text{ мм}; \quad \frac{m_3}{k} = \frac{t_{\text{oc2}}}{H} = \frac{D_2}{D_1}.$$

1.29

$$\frac{m_3}{k} = \frac{\pi D}{zH} \text{ctg } \omega \Rightarrow \text{tg } \omega = \frac{\pi D}{zH} \cdot \frac{k}{m_3};$$

$$\text{tg } 15^\circ \leq \frac{\pi D}{zH} \cdot \frac{k}{m_3} \leq \text{tg } 25^\circ; \quad \frac{m_3 z H}{\pi D} \text{tg } 15^\circ \leq k \leq \frac{m_3 z H}{\pi D} \text{tg } 25^\circ; \quad k = 2.$$

1.30

$$s_z = \frac{v_s}{nz} = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{D}{z} \cdot \frac{v_s}{v}, \text{ мм/зуб}; \quad f = k \frac{s_z t}{\sin \omega}, \text{ мм}^2.$$

1.31

$$s_o = \frac{a}{\sin \varphi}, \text{ мм/об}; \quad t = \frac{f}{s_o}, \text{ мм}; \quad \varphi_1 = 90^\circ - \varphi; \quad \tau_m = \frac{L + t(\text{ctg } \varphi + \text{ctg } \varphi_1)}{ns_o}, \text{ мин.}$$

1.37

$$t = \frac{D}{2}, \text{ мм}; s_o = \frac{\Pi}{vt} = \frac{2\Pi}{vD}, \text{ мм/об}; n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин};$$

$$v_s = ns_o = \frac{2000\Pi}{\pi D^2}, \text{ мм/мин}; \tau_M = \frac{L + t \operatorname{ctg} \varphi}{v_s} = \frac{L + 0,5D \operatorname{ctg} \varphi}{2000\Pi} \pi D^2, \text{ мин.}$$

1.38

$$s_z = \frac{s_o}{2}, \text{ мм}; \sin \varphi = \frac{a_z}{s_z} = \frac{2a_z}{s_o}; \operatorname{ctg} \varphi = \sqrt{\operatorname{cosec}^2 \varphi - 1}; t = \frac{D}{2}, \text{ мм};$$

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; \tau_M = \frac{L + t \operatorname{ctg} \varphi}{ns_o}, \text{ мин.}$$

1.39

$$t = \frac{D - D_o}{2}, \text{ мм}; \tau_{M1} = \frac{L + t \operatorname{ctg} \varphi}{v_s}; \tau_{M2} = \frac{L(1 + \Delta/100) + t \operatorname{ctg} \varphi}{v_s}, \text{ мин};$$

$$\delta = \frac{\tau_{M2} - \tau_{M1}}{\tau_{M1}} \cdot 100 \% = \frac{\Delta \cdot L}{L + t \operatorname{ctg} \varphi}, \%$$

1.40

$$\Delta = y_B - y_A = 0,5(D_B \operatorname{ctg} \varphi_B - D_A \operatorname{ctg} \varphi_A), \text{ мм.}$$

1.41

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; s_o = s_z z, \text{ мм/об};$$

$$\tau_M = \frac{L + t \operatorname{ctg} \varphi}{ns_o} = \frac{L + t \operatorname{ctg} \varphi}{1000vs_z z} \pi D \Rightarrow L = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{vs_z z}{D} \tau_M - t \operatorname{ctg} \varphi, \text{ мм.}$$

1.42

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; v_s = ns_z z = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{vs_z z}{D}, \text{ мм/мин};$$

$$\tau_M = \frac{L + t \operatorname{ctg} \varphi}{vs_z z} \cdot \frac{\pi D}{1000}, \text{ мин.}$$

1.43

$$\Pi = ts_o v = ts_o \frac{\pi D n}{1000} \Rightarrow ns_o = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{\Pi}{Dt}, \text{ мм/мин};$$

$$\tau_M = \frac{L + t \operatorname{ctg} \varphi}{ns_o} \Rightarrow \operatorname{ctg} \varphi = \frac{ns_o \tau_M - L}{t}.$$

1.44

$$v_s = s_z z n = s_z z \frac{1000v}{\pi D} \Rightarrow D = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{v}{v_s} s_z z, \text{ мм}; \tau_M = \frac{L + \sqrt{Dt - t^2}}{v_s}, \text{ мин.}$$

1.45

$$\tau_{Mi} = \frac{L + \sqrt{D_i t - t^2}}{v_s}, \text{ мин}; \Delta\tau = \frac{\tau_{M2} - \tau_{M1}}{\tau_{M1}} \cdot 100\% = \left(\frac{L + \sqrt{D_2 t - t^2}}{L + \sqrt{D_1 t - t^2}} - 1 \right) \cdot 100\%.$$

1.46

$$\tau_{Mi} = \frac{L + \sqrt{D_i t - t^2}}{v_{si}} = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{L + \sqrt{D_i t - t^2}}{s_o v} D_i, \text{ мин};$$

$$n_i = \frac{1000v}{\pi D_i}, \text{ об/мин}; v_{si} = n_i s_o = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{s_o v}{D_i}, \text{ мм/мин};$$

$$\Delta\tau = \left(\frac{\tau_{M2}}{\tau_{M1}} - 1 \right) \cdot 100\% = \left(\frac{L + \sqrt{D_2 t - t^2}}{L + \sqrt{D_1 t - t^2}} \cdot \frac{D_2}{D_1} - 1 \right) \cdot 100\%.$$

1.47

$$\Pi = t s_o v \frac{B}{\pi D} = 0,001 t s_o n B \Rightarrow v_s = \frac{1000\Pi}{Bt}, \text{ мм/мин};$$

$$\tau_M = \frac{L + \sqrt{Dt - t^2}}{v_s} = \frac{L + \sqrt{Dt - t^2}}{1000\Pi} Bt \Rightarrow D = \left(\frac{1000\tau_M\Pi}{Bt} - L \right)^2 \frac{1}{t} + t, \text{ мм.}$$

1.48

$$B = \frac{1000\tau_M\Pi}{60t(L + \sqrt{Dt - t^2})}, \text{ мм}; t_{oc} = \frac{\pi D}{z} \text{ ctg } \omega, \text{ мм}; \frac{B}{t_{oc}} = k \in \mathbf{N}.$$

1.49

$$\tau_M = \frac{L + \sqrt{Dt - t^2}}{v_s} \Rightarrow Dt - t^2 = (v_s \tau_M - L)^2; t - \text{ из квадратного уравнения.}$$

1.50

$$\tau_M = \frac{L + \sqrt{Dt - t^2}}{n s_z z} = \frac{L + \sqrt{Dt - t^2}}{1000 v s_z z} \pi D \Rightarrow z = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{D}{v s_z \tau_M} \left(L + \sqrt{Dt - t^2} \right).$$

К главе 2

2.01

$$v_1 = \frac{v}{K_a} = \frac{va}{a_1} = \frac{\pi D_o n}{1000} \cdot \frac{s_o \sin \varphi}{a_1} = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{v_s D_o \sin \varphi}{a_1}, \text{ м/мин.}$$

2.02

$$K_a = \frac{a_1}{a} = \frac{a_1}{s_o \sin \varphi}; \quad v_1 = \frac{v}{K_a} = \frac{\pi D_o n}{1000} \cdot \frac{s_o \sin \varphi}{a_1}, \text{ м/мин.}$$

2.03

$$v_1 = \frac{v}{K_a} = \frac{va}{a_1} = \frac{vs_o \sin \varphi}{a_1} = \frac{ts_o v \sin \varphi}{ta_1} = \frac{\Pi}{ba_1}, \text{ м/мин.}$$

2.04

$$s_o = \frac{f}{t}, \text{ мм/об; } a = s_o \sin \varphi = \frac{f}{t} \sin \varphi, \text{ мм; } K_a = \frac{a_1}{a} = \frac{a_1 t}{f \sin \varphi};$$

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma}; \quad \varepsilon_o = \operatorname{ctg} \Phi + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma).$$

2.05

$$= 120^\circ - \varphi_1 = 90^\circ; \quad a = s_o \sin \varphi = s_o, \text{ мм; } K_a = \frac{a_1}{a} = \frac{a_1}{s_o};$$

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma} = \frac{\cos \gamma}{(a_1/s_o) - \sin \gamma}; \quad \varepsilon_o = \operatorname{ctg} \Phi + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma).$$

2.06

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma} \Rightarrow K_a \operatorname{tg} \Phi - \operatorname{tg} \Phi \sin \gamma = \cos \gamma; \quad K_a \operatorname{tg} \Phi = 1;$$

$$1 - \operatorname{tg} \Phi \sin \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma} \Rightarrow \begin{cases} \sin \gamma = 0 - \text{не соответствует условиям;} \\ \sin \gamma = \frac{2 \operatorname{tg} \Phi}{1 + \operatorname{tg}^2 \Phi} = \sin 2\Phi; \quad \gamma = 2\Phi; \end{cases}$$

$$\varepsilon_o = \operatorname{ctg} \Phi + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma) = \operatorname{ctg} \Phi - \operatorname{tg} \Phi.$$

2.07

$$v_s = ns_z z, \text{ мм/мин;}$$

$$v = v_1 K_a = v_1 \frac{a_1}{a_z} = v_1 \frac{a_1}{s_z \sin \varphi} = v_1 \frac{a_1 n z}{v_s \sin \varphi} = \frac{\pi D n}{1000} \Rightarrow \sin \varphi = \frac{1000}{\pi} \cdot \frac{a_1 z}{D} \cdot \frac{v_1}{v_s}.$$

2.08

$$\Pi = ts_0 v = \frac{D}{2} z s_z v \Rightarrow s_z = \frac{2\Pi}{Dz v}, \text{ мм};$$

$$K_a = \frac{a_1}{a_z} = \frac{a_1}{s_z \sin \varphi}; v_1 = \frac{v}{K_a} = \frac{2\Pi}{a_1 D z} \sin \varphi, \text{ м/мин.}$$

2.09

$$a = s_0 \sin \varphi, \text{ мм}; N_1 \approx P_z \Rightarrow n_1 = \frac{P_z}{bl_1} = \frac{C_{pz} (s_0 \sin \varphi)^{y_{pz}} v^{z_{pz}}}{l_1}, \text{ МПа.}$$

2.10

$$P_N = \frac{P_y}{\cos \varphi}, \text{ Н}; F_1 \approx P_N \Rightarrow f_1 = \frac{kP_z}{bl_1 \cos \varphi} = \frac{kC_{pz} (s_0 \sin \varphi)^{y_{pz}} v^{z_{pz}}}{l_1 \cos \varphi}, \text{ МПа.}$$

2.11

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм}; N_{1,2} = n_{1,2} b l_{1,2}, \text{ Н}; F_{1,2} = f_{1,2} b l_{1,2}, \text{ Н};$$

$$P_z = N_1 \cos \gamma + F_1 \sin \gamma + F_2, \text{ Н}; P_N = F_1 \cos \gamma - N_1 \sin \gamma + N_2, \text{ Н};$$

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_N^2}, \text{ Н.}$$

2.12

$$\begin{cases} n_1 l_1 + f_2 l_2 = \frac{P_z}{b}; \\ f_1 l_1 + n_2 l_2 = \frac{P_N}{b}; \end{cases} \Delta = \begin{vmatrix} n_1 & f_2 \\ f_1 & n_2 \end{vmatrix}; \Delta_1 = \frac{1}{b} \begin{vmatrix} P_z & f_2 \\ P_N & n_2 \end{vmatrix};$$

$$l_1 = \frac{1}{b} \cdot \frac{P_z n_2 - P_N f_2}{n_1 n_2 - f_1 f_2} = \frac{1}{b} \cdot \frac{P_z - P_N}{n_1 - f_1}, \text{ мм.}$$

2.13

$$P_N = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \text{ Н}; n_1 = 2f_1; n_2 = f_2; \begin{cases} (n_1 \cos \gamma + f_1 \sin \gamma) l_1 + f_2 l_2 = \frac{P_z}{b}; \\ (f_1 \cos \gamma - n_1 \sin \gamma) l_1 + n_2 l_2 = \frac{P_N}{b}; \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} n_1 \cos \gamma + f_1 \sin \gamma & f_2 \\ f_1 \cos \gamma - n_1 \sin \gamma & n_2 \end{vmatrix}; \Delta_2 = \frac{1}{b} \begin{vmatrix} n_1 \cos \gamma + f_1 \sin \gamma & P_z \\ f_1 \cos \gamma - n_1 \sin \gamma & P_N \end{vmatrix};$$

$$l_2 = \frac{1}{b} \cdot \frac{P_N (2 \cos \gamma + \sin \gamma) - P_z (\cos \gamma - 2 \sin \gamma)}{n_2 (\cos \gamma + 3 \sin \gamma)} = \frac{1}{b} \cdot \frac{P_N (2 + \text{tg } \gamma) - P_z (1 - 2 \text{tg } \gamma)}{n_2 (1 + 3 \text{tg } \gamma)}, \text{ мм.}$$

2.14

$$P_N = \sqrt{P^2 - P_z^2}, \text{ H}; N_{1,2} = n_{1,2} b l_{1,2}, \text{ H};$$

$$P_z = b(n_1 l_1 + f_2 l_2) \Rightarrow f_2 = \frac{1}{l_2} \left(\frac{P_z}{b} - n_1 l_1 \right), \text{ МПа};$$

$$P_N = b(f_1 l_1 + n_2 l_2) \Rightarrow f_1 = \frac{1}{l_1} \left(\frac{P_N}{b} - n_2 l_2 \right), \text{ МПа}.$$

2.15

$$b = \frac{D}{2 \sin \varphi}, \text{ мм}; F_1 = f_1 b l_1 = \frac{D l_1}{2 \sin \varphi} f_1, \text{ H}; P_N = F_1;$$

$$P_{\text{oc}} = 2 P_x = 2 P_N \sin \varphi = D l_1 f_1, \text{ H}.$$

2.16

$$N_1 = \frac{D l_1}{2 \sin \varphi} n_1, \text{ H}; P_z = N_1; M = \frac{P_z D}{2000} = 25 \cdot 10^{-5} \frac{D^2 l_1}{\sin \varphi} n_1, \text{ H} \cdot \text{ м}.$$

2.17

$$P_{\text{теор}} = 0,9 \sqrt{2 a b \sigma_b} \sqrt{\left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} \right)^2 + 1};$$

$$P_{\text{эксн}} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}; \Delta P = \frac{P_{\text{теор}} - P_{\text{эксн}}}{P_{\text{эксн}}} \cdot 100 \%$$

2.18

$$ab = \frac{\Pi}{v}, \text{ мм}^2; P_N = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \text{ H}; P_N \approx 0,9 a b \sigma_b \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$K_a \approx \left(\frac{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}{0,9 \sigma_b} \cdot \frac{v}{\Pi} + 1 \right) \cos \gamma + \sin \gamma; v_1 = \frac{v}{K_a}, \text{ м/мин}.$$

2.19

$$P_z \approx 0,9 \sigma_b \frac{\Pi}{v} \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right), \text{ H}; P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \text{ H}; W_3 = \frac{P_z v}{60}, \text{ Вт}.$$

2.20

$$s_o = \frac{v_s}{n}, \text{ мм/об}; P_z \approx 0,9\sigma_n t \frac{v_s}{n} \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right), \text{ Н}; v = \frac{\pi D_o n}{1000}, \text{ м/мин};$$

$$W_3 = \frac{P_z v}{60} = 1,5 \cdot 10^{-5} \pi D_o t v_s \sigma_n \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right), \text{ Вт}.$$

2.21

$$\delta = 90^\circ - \gamma; C_{pz} t s_o^{y_{pz}} v^{z_{pz}} (90 - \gamma)^{u_{pz}} = 0,9 t s_o \sigma_n (\text{ctg } \Phi + 1) \Rightarrow$$

$$\text{ctg } \Phi = \frac{C_{pz} v^{z_{pz}} (90 - \gamma)^{u_{pz}}}{0,9 s_o^{1-y_{pz}} \sigma_n} - 1; \varepsilon_o = \text{ctg } \Phi + \text{tg}(\Phi - \gamma).$$

2.22

$$\frac{P_N}{P_z} = \frac{0,9ab\sigma_n (\text{ctg } \Phi - 1)}{0,9ab\sigma_n (\text{ctg } \Phi + 1)} = \frac{1 - \text{tg } \Phi}{1 + \text{tg } \Phi}; \text{arctg } \frac{P_N}{P_z} = 10^\circ < \alpha.$$

2.23

$$P_N = \frac{P_y}{\cos \varphi}, \text{ Н}; P_z = \sqrt{P^2 - P_N^2} = \frac{1}{\cos \varphi} \sqrt{P^2 \cos^2 \varphi - P_y^2}, \text{ Н};$$

$$\frac{P_N}{P_z} = \frac{P_y}{\sqrt{P^2 \cos^2 \varphi - P_y^2}}; \text{arctg } \frac{P_N}{P_z} = 8^\circ > \alpha.$$

2.24

$$\frac{P_N}{P_z} = \frac{P_y}{\sqrt{P^2 \cos^2 \varphi - P_y^2}}; \alpha < \text{arctg } \frac{P_N}{P_z}.$$

2.25

$$\frac{P_N}{P_z} = \frac{\sqrt{P^2 - P_z^2}}{P_z} > \text{tg } \alpha; \frac{P^2 - P_z^2}{P_z^2} > \text{tg}^2 \alpha \Rightarrow P_z < P \cos \alpha; W_3 < \frac{Pv}{60} \cos \alpha, \text{ Вт}.$$

2.26

$$P_N = \frac{P_x}{\sin \varphi}, \text{ Н}; \frac{P_N}{P_z} = \frac{P_N}{\sqrt{P^2 - P_N^2}} = \frac{P_x}{\sqrt{P^2 \sin^2 \varphi - P_x^2}} > \text{tg } \alpha;$$

$$\frac{P^2 \sin^2 \varphi - P_x^2}{P_x^2} < \text{ctg}^2 \alpha; \left(\frac{P \sin \varphi}{P_x} \right)^2 < \text{ctg}^2 \alpha + 1 = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \Rightarrow \sin \varphi < \frac{P_x}{P \sin \alpha}.$$

2.27

$$\delta = 90^\circ - \gamma; t = \frac{D_o - d}{2}, \text{ мм}; s_o = \frac{v_s}{n} = \frac{\pi D_o}{1000} \cdot \frac{v_s}{v}, \text{ мм/об}; W_3 = \frac{P_z v}{60}, \text{ Вт.}$$

2.28

$$W_3 = \frac{C_{pz}}{60} \cdot \frac{D_o - d}{2} v_s^{y_{pz}} n^{1 - y_{pz} + z_{pz}} \left(\frac{\pi D_o}{1000} \right)^{1 + z_{pz}} (90 - \gamma)^{u_{pz}} < W\eta \Rightarrow$$

$$n < \left(\frac{120W\eta}{C_{pz}(D_o - d)v_s^{y_{pz}}(90 - \gamma)^{u_{pz}}} \cdot \left(\frac{1000}{\pi D_o} \right)^{1 + z_{pz}} \right)^{1/(1 - y_{pz} + z_{pz})}, \text{ об/мин.}$$

2.29

$$v = \frac{\Pi}{s_o t}, \text{ м/мин}; P_z = C_{pz} t^{1 - z_{pz}} s_o^{y_{pz} - z_{pz}} \Pi^{z_{pz}} (90 - \gamma)^{u_{pz}}, \text{ Н}; P_x + \xi(P_y + P_z + G) < P_T.$$

2.30

$$P_z = \frac{60W_3}{v}, \text{ Н}; P_x = P_N \sin \varphi = \sin \varphi \sqrt{P^2 - \left(\frac{60W_3}{v} \right)^2}, \text{ Н};$$

$$P_y = P_N \cos \varphi = \cos \varphi \sqrt{P^2 - \left(\frac{60W_3}{v} \right)^2}, \text{ Н};$$

$$P_T > \sin \varphi \sqrt{P^2 - \left(\frac{60W_3}{v} \right)^2} + \xi \left(\cos \varphi \sqrt{P^2 - \left(\frac{60W_3}{v} \right)^2} + \frac{60W_3}{v} + mg \right), \text{ Н.}$$

2.31

$$W_3 = \frac{P_z v}{60} = \frac{\pi D_o n}{6 \cdot 10^4} P_z, \text{ Вт}; \frac{P_N}{P_z} = \psi; P_x = P_N \sin \varphi = P_z \psi, \text{ Н}; P_y = 0;$$

$$P_z \psi + \xi(P_z + G) \leq [P_T] \Rightarrow P_z \leq \frac{[P_T] - \xi G}{\psi + \xi}, \text{ Н};$$

$$\frac{6 \cdot 10^4 W_3}{\pi D_o n} \leq \frac{[P_T] - \xi G}{\psi + \xi} \Rightarrow D_o \geq \frac{6 \cdot 10^4 W_3}{\pi n} \cdot \frac{\psi + \xi}{[P_T] - \xi G}, \text{ мм.}$$

2.32

$$\frac{60W_3}{v} \leq \frac{[P_T] - \xi G}{\psi + \xi} \Rightarrow \psi \leq \frac{[P_T] - \xi G}{60W_3} v - \xi; \frac{P_z}{P_N} = \frac{1}{\psi} \geq \left(\frac{[P_T] - \xi G}{60W_3} v - \xi \right)^{-1}.$$

2.33

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм}; a_z = \frac{S_o}{z} \sin \varphi, \text{ мм};$$

$$P_z = C_{pz} t \left(\frac{S_o}{z} \right)^{y_{pz}} (\sin \varphi)^{y_{pz}-1} v^{z_{pz}}; M = \frac{3(D-t)}{2000} P_z, \text{ Н} \cdot \text{ м};$$

$$P_x = P_N \sin \varphi = C_{pN} t^{x_{pN}} \left(\frac{S_o}{z} \right)^{y_{pN}} (\sin \varphi)^{y_{pN}-x_{pN}+1} v^{z_{pN}}, \text{ Н}; P_{oc} = z P_x, \text{ Н}.$$

2.34

$$W_3 = \frac{\pi}{30} M n = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{3P_z(D-t)}{2000} \cdot \frac{1000v}{\pi D} = \frac{C_{pz}}{20} t \left(\frac{S_o}{z} \right)^{y_{pz}} (\sin \varphi)^{y_{pz}-1} v^{z_{pz}+1} \left(1 - \frac{t}{D} \right) \Rightarrow$$

$$s_o = z \left(\frac{20W_3}{C_{pz}t} \cdot \frac{(\sin \varphi)^{1-y_{pz}}}{v^{z_{pz}+1}} \cdot \frac{D}{D-t} \right)^{1/y_{pz}}, \text{ мм/об}.$$

2.35

$$P_x = \frac{P_{oc}}{z}; P_N = \frac{P_x}{\sin \varphi}; P_z = \sqrt{P^2 - P_N^2}, \text{ Н}; t = \frac{D - D_o}{2}, \text{ мм}; D - t = \frac{D + D_o}{2}, \text{ мм};$$

$$M = \frac{z(D-t)}{2000} P_z = \frac{z(D+D_o)}{4000} \sqrt{P^2 - \left(\frac{P_{oc}}{z \sin \varphi} \right)^2}, \text{ Н} \cdot \text{ м}.$$

2.36

$$M = \frac{z(D+D_o)}{4000} P_z \Rightarrow P_z = \frac{4000M}{z(D+D_o)}, \text{ Н}; P_x = \frac{P_{oc}}{z}, \text{ Н};$$

$$P_N = \frac{P_x}{\sin \varphi} = \frac{P_{oc}}{z \sin \varphi}, \text{ Н}; P = \sqrt{P_z^2 + P_N^2} = \frac{1}{z} \sqrt{\left(\frac{4000M}{D+D_o} \right)^2 + \left(\frac{P_{oc}}{\sin \varphi} \right)^2}, \text{ Н}.$$

2.37

$$q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right] = 1; \tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}};$$

$$a_{z \max} = s_z \sin \tau = \frac{v_s}{n z} \sin \left(\frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \right), \text{ мм}; \delta = 90^\circ - \gamma; v = \frac{\pi D n}{1000}, \text{ м/мин};$$

$$P_{z1 \max} = 35 B a_{z \max}^{0.75} v^{-0.15} \delta^{0.94}, \text{ Н}; M_{1 \max} = \frac{P_{z1 \max} D}{2000}, \text{ Н} \cdot \text{ м}.$$

2.38

$$q_{\text{HOB}} = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t_{\text{HOB}}}{D}} + 1 \right] = 2; \quad \tau_{\text{HOB}} = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t_{\text{HOB}}}{D}}; \quad a_{z1\text{max}} = \frac{v_s}{nz} \sin \left(\frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t_{\text{HOB}}}{D}} \right), \text{ мм};$$

$$P_{z1\text{max}}^{\text{HOB}} = 35 B a_{z1\text{max}}^{0,75} v^{-0,15} \delta^{0,94}, \text{ H}; \quad M_{1\text{max}}^{\text{HOB}} = \frac{P_{z1\text{max}}^{\text{HOB}} D}{2000}, \text{ H} \cdot \text{ м}; \quad \varepsilon_z = \frac{360}{z};$$

$$\mu_2 = \tau_{\text{HOB}} - \varepsilon_z; \quad a_{z2} = \frac{v_s}{nz} \sin(\tau_{\text{HOB}} - \varepsilon_z); \quad P_{z2} = 35 B a_{z2}^{0,75} v^{-0,15} \delta^{0,94}, \text{ H};$$

$$M_{\text{max}} = \frac{D}{2000} (P_{z1\text{max}}^{\text{HOB}} + P_{z2}), \text{ H} \cdot \text{ м}; \quad \Delta M = \frac{M_{1\text{max}}^{\text{HOB}}}{M_{\text{max}}} \cdot 100 \%$$

2.39

$$t_{\text{окр}} = \frac{\pi D}{z} \Rightarrow D = \frac{t_{\text{окр}} z}{\pi}, \text{ мм}; \quad q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right] = 2; \quad \tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad \varepsilon_z = \frac{360}{z};$$

$$a_{z1\text{max}} = s_z \sin \tau, \text{ мм}; \quad P_{z1\text{max}} = C a_{z1\text{max}} B, \text{ H}; \quad M_{1\text{max}} = \frac{P_{z1\text{max}} D}{2000}, \text{ H} \cdot \text{ м};$$

$$a_{z2} = s_z \sin(\tau - \varepsilon_z); \quad P_{z2} = C a_{z2} B, \text{ H};$$

$$M_{\text{max}} = \frac{(P_{z1\text{max}} + P_{z2}) D}{2000}, \text{ H} \cdot \text{ м}; \quad \Delta M = \frac{M_{1\text{max}}}{M_{\text{max}}} \cdot 100 \%;$$

$$\frac{M_{1\text{max}}}{M_{\text{max}}} = \frac{P_{z1\text{max}}}{P_{z1\text{max}} + P_{z2}} = \frac{a_{z1\text{max}}}{a_{z1\text{max}} + a_{z2}} = \frac{\sin \tau}{\sin \tau + \sin(\tau - \varepsilon_z)}.$$

2.40

$$\Pi = t s_o v \frac{B}{\pi D} \Rightarrow \frac{t}{D} = \pi \frac{\Pi}{s_z z v B}; \quad q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right] = 3; \quad \tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad \varepsilon_z = \frac{360}{z};$$

$$\Delta M = \frac{\sin \tau}{\sin \tau + \sin(\tau - \varepsilon_z) + \sin(\tau - 2\varepsilon_z)} \cdot 100 \%$$

2.41

$$q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right] = 1 \Rightarrow M_{\text{max}}^{\text{ст}} = M_{1\text{max}}; \quad M_{\text{max}}^{\text{нов}} = \frac{M_{\text{max}}^{\text{ст}}}{\Delta M} \cdot 100 \%, \text{ H} \cdot \text{ м};$$

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; \quad W_3 = \frac{\pi n}{30} M_{\text{max}}^{\text{нов}} = \frac{10^4}{3} \cdot \frac{v}{D} \cdot \frac{M_{\text{max}}^{\text{ст}}}{\Delta M}, \text{ Вт}.$$

2.42

$$q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right] = 2; \quad \tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad \varepsilon_z = \frac{360}{z}; \quad s_z = \frac{s_0}{z}, \text{ мм/3yб};$$

$$a_{z1\max} = s_z \sin \tau, \text{ мм}; \quad a_{z2} = s_z \sin(\tau - \varepsilon_z), \text{ мм}; \quad P_{z1} = 1000 C_{pz} a_{z1}^{0,75}, \text{ H};$$

$$P_{N1} = 1000 C_{pN} a_{z1}^{0,5}, \text{ H}; \quad P_{z2} = 1000 C_{pz} a_{z2}^{0,75}, \text{ H}; \quad P_{N2} = 1000 C_{pN} a_{z2}^{0,5}, \text{ H};$$

$$P_H = P_{z1} \cos \tau + P_{z2} \cos(\tau - \varepsilon_z) + P_{N1} \sin \tau + P_{N2} \sin(\tau - \varepsilon_z), \text{ H}.$$

2.43

$$P_H = P_{z1} \cos \tau + P_{z2} \cos(\tau - \varepsilon_z) - P_{N1} \sin \tau - P_{N2} \sin(\tau - \varepsilon_z), \text{ H}.$$

2.44

$$q = \left[\frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} + 1 \right] = 1; \quad \tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}};$$

$$\left. \begin{aligned} P_H &= P_z \cos \tau + P_N \sin \tau; \\ P_V &= P_z \sin \tau - P_N \cos \tau; \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_z = P_H \cos \tau + P_V \sin \tau, \text{ H}; \quad M = \frac{D}{2000} P_z, \text{ H} \cdot \text{м};$$

$$W_3 = \frac{\pi}{30} Mn = \frac{\pi D n}{6 \cdot 10^4} (P_H \cos \tau + P_V \sin \tau) = 4790 \text{ Вт}; \quad W_3 > W \frac{\eta}{100}.$$

2.45

$$\varepsilon_z = \frac{360}{z}; \quad P_V \rightarrow \min \text{ при } \mu \rightarrow (\tau - \varepsilon_z);$$

$$\left. \begin{aligned} P_H &= P_z \cos(\tau - \varepsilon_z) - P_N \sin(\tau - \varepsilon_z); \\ P_V &= P_z \sin(\tau - \varepsilon_z) + P_N \cos(\tau - \varepsilon_z); \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_z = P_H \cos(\tau - \varepsilon_z) + P_V \sin(\tau - \varepsilon_z), \text{ H};$$

$$M = \frac{D}{2000} P_z, \text{ H} \cdot \text{м}.$$

2.46

$$s_0 = s_{z2}, \text{ мм/об}; \quad M_{\text{тп}} > M \Rightarrow \frac{\bar{d}}{\rho} > \frac{10^5}{6} \cdot \frac{M}{P_{\text{oc}}} = \frac{10^5}{6} \cdot \frac{C_M}{C_P} \cdot \frac{D}{(s_z z)^{0,1}}, \text{ мм}.$$

2.47

$$\frac{\bar{d}}{\rho} = 220 \text{ мм}; \quad M_{\text{тп}} = 6 \cdot 10^{-5} P_{\text{oc}} \frac{\bar{d}}{\rho} > M;$$

$$8,976 D s_0^{0,7} > 0,345 D^2 s_0^{0,8} \Rightarrow s_0 < \left(\frac{26,017}{D} \right)^{10}; \quad s_z = \frac{s_0}{2}, \text{ мм/3yб}.$$

2.48

$$M_{\text{тр}} = 6 \cdot 10^{-5} P_{\text{ос}} \frac{\bar{d}}{\rho}, \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{max}} = M_{\text{тр}}; \frac{\pi}{30} M_{\text{max}} n = W_3^{\text{max}} < W\eta \Rightarrow$$

$$n < \frac{30}{\pi} \cdot \frac{W\eta}{M_{\text{тр}}} = \frac{5 \cdot 10^5}{\pi} \cdot \frac{W\eta}{P_{\text{ос}}} \left(\frac{\bar{d}}{\rho} \right)^{-1}, \text{ об/мин.}$$

2.49

$$P_z \approx 0,9ab\sigma_s \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right), \text{ Н}; \sigma_1 = \frac{6L_1}{B_1 H_1^2} P_z, \text{ МПа}; \sigma_o = \frac{6L_o}{B_o H_o^2} P_z, \text{ МПа.}$$

2.50

$$P_N = \frac{P_y}{\cos \varphi}, \text{ Н}; P_z = \sqrt{P^2 - P_N^2}, \text{ Н};$$

$$\frac{6L_o}{B_o H_o^2} P_z \leq [\sigma_{\text{н}}] \Rightarrow L_o \leq \frac{B_o H_o^2}{6\sqrt{P^2 - (P_y / \cos \varphi)^2}} [\sigma_{\text{н}}], \text{ мм.}$$

К главе 3

3.01

$$\gamma = 90^\circ - \delta; \alpha = \frac{\gamma}{2}; l_2 = h \frac{1 - \text{tg} \alpha \text{tg} \gamma}{\text{tg} \alpha} = h(\text{ctg} \alpha - \text{tg} \gamma), \text{ мм.}$$

3.02

$$\Delta l_2 = h(\text{ctg} \alpha - \text{tg} \gamma), \text{ мм}; l_2 = l_{20} + \Delta l_2, \text{ мм.}$$

3.03

$$k = \frac{h}{l_2} \leq \frac{1}{\text{ctg} \alpha - \text{tg} \gamma} \Rightarrow \text{ctg} \alpha \leq \frac{1}{k} - \text{tg} \gamma; \alpha \geq \text{arccctg} \left(\frac{1}{k} - \text{tg} \gamma \right).$$

3.04

$$d = D_o - 2t, \text{ мм}; A = \pi(D_o - 2t)L, \text{ мм}; \tilde{h} = \frac{h}{\pi(D_o - 2t)LN} \cdot 10^6, \text{ мм/м}^2.$$

3.05

$$D = \frac{1000v}{\pi n}, \text{ мм}; A = \frac{\pi DL}{z} = \frac{500vL}{n}, \text{ мм}^2; \tilde{h} = \frac{h}{A} \cdot 10^6 = \frac{2000nh}{vL}, \text{ мм/м}^2.$$

3.06

$$\frac{\tau_M}{60} = \frac{L + 0,5D \operatorname{ctg} \varphi}{v_s}, \text{ мин} \Rightarrow L = \frac{\tau_M}{60} v_s - \frac{D}{2} \operatorname{ctg} \varphi, \text{ мм};$$

$$A = \frac{\pi DL}{z} = \frac{\pi D}{z} \left(\frac{\tau_M}{60} v_s - \frac{D}{2} \operatorname{ctg} \varphi \right), \text{ мм}^2;$$

$$h = A \tilde{h} \cdot 10^{-6} = \frac{\pi D \tilde{h}}{z} \left(\frac{\tau_M}{60} v_s - \frac{D}{2} \operatorname{ctg} \varphi \right) \cdot 10^{-6}, \text{ мм}.$$

3.07

$$\Delta = \frac{v_2 - v_1}{v_1} \cdot 100\% = \left(\frac{v_2}{v_1} - 1 \right) \cdot 100\%; \quad \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{0,2}; \quad \Delta = (0,5^{0,2} - 1) \cdot 100\%.$$

3.08

$$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m s_o^{y_v}}, \text{ м/мин}; \quad \Pi = t S_o v = \frac{C_v D^{1+q_v}}{2 T^m} s_o^{1-y_v}, \text{ см}^3 / \text{мин}.$$

3.09

$$v_s = n s_o = \frac{1000 s_o v}{\pi D} \Rightarrow v = \frac{\pi}{1000} \cdot \frac{v_s D}{s_o}, \text{ м/мин};$$

$$\frac{\pi}{1000} \cdot \frac{v_s D}{s_o} = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m s_o^{y_v}} \Rightarrow T = \left(\frac{1000 C_v}{\pi} \cdot \frac{s_o^{1-y_v}}{v_s D^{1-q_v}} \right)^{1/m}, \text{ мин}.$$

3.10

$$t = \frac{f}{s_o}, \text{ мм}; \quad v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m (f/s_o)^{x_v} s_o^{y_v}} \Rightarrow s_o = \left(\frac{C_v D^{q_v}}{v T^m f^{x_v}} \right)^{1/(y_v - x_v)}, \text{ мм/об};$$

$$s_z = \frac{s_o}{z}, \text{ мм/зуб}.$$

3.11

$$s_o = \frac{v_s}{n} = \frac{\pi D}{1000} \cdot \frac{v_s}{v}, \text{ мм/об}; \quad v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m t^{x_v}} \cdot \left(\frac{1000}{\pi D} \cdot \frac{v}{v_s} \right)^{y_v} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t = \left(\frac{C_v D^{q_v - y_v}}{T^m v^{1-y_v}} \cdot \left(\frac{1000}{\pi v_s} \right)^{y_v} \right)^{1/x_v}, \text{ мм}; \quad D_o = D - 2t, \text{ мм}.$$

3.12

$$\tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \Rightarrow t = \left(\frac{\pi \tau}{360} \right)^2 D, \text{ мм}; \quad v = \frac{C_v D^{q_v - x_v}}{T^m s_o^{y_v} B^{u_v} z^{p_v - y_v}} \left(\frac{360}{\pi \tau} \right)^{2x_v}, \text{ м/мин.}$$

3.13

$$n = \frac{1000v}{\pi D_o}, \text{ об/мин}; \quad \tau_M = \frac{L + t(\text{ctg } \varphi + \text{ctg } \varphi_1)}{1000 s_o v} \pi D_o, \text{ мин}; \quad k = \frac{\tau_{\text{оп}}}{\tau_M};$$

$$B_1 = k_o E_c \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб/мин}; \quad B_2 = 0; \quad B_3 = \frac{Q}{i_{\text{гр}}}, \text{ руб.}; \quad T_{\text{эк}} = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_2 + B_3}{B_1}, \text{ мин.}$$

3.14

$$I = i_{\text{гр}} T_{\text{эк}}, \text{ мин}; \quad K = \frac{N}{I} \tau_M, \text{ шт.}$$

3.15

$$B_1 = k_o E_c \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб/мин}; \quad B_2 = 0; \quad B_3 = \frac{Q}{i_{\text{гр}}}, \text{ руб.}; \quad T_{\text{эк}} = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_2 + B_3}{B_1}, \text{ мин};$$

$$t = \frac{D_o - d}{2}, \text{ мм}; \quad v = \frac{C_v}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s_o^{y_v}}, \text{ м/мин}; \quad n = \frac{1000v}{\pi D_o}, \text{ об/мин.}$$

3.16

$$\varphi = 60^\circ - \varphi_1; \quad \tau_M = \frac{L + t \text{ctg } \varphi}{n s_o}, \text{ мин}; \quad C = \tau_M \left(B_1 + \frac{B_2 + B_3}{T_{\text{эк}}} \right), \text{ руб.}$$

3.17

$$n_{\text{рез}} = \frac{1000v_{\text{рез}}}{\pi d}, \text{ об/мин}; \quad t = \frac{d - D_o}{2}, \text{ мм};$$

$$\tau_M^{\text{рез}} = \frac{L + t(\text{ctg } \varphi_{\text{рез}} + \text{ctg } \varphi_{1\text{рез}})}{n_{\text{рез}} s_o^{\text{рез}}}, \text{ мин}; \quad I_{\text{рез}} = i_{\text{гр}} T_{\text{рез}}, \text{ мин}; \quad Z_{\text{рез}} = \frac{Q_{\text{рез}}}{I_{\text{рез}}} \tau_M^{\text{рез}}, \text{ руб/шт.};$$

$$n_{\text{зен}} = \frac{1000v_{\text{зен}}}{\pi D}, \text{ об/мин}; \quad s_o^{\text{зен}} = s_z z, \text{ мм/об}; \quad \tau_M^{\text{зен}} = \frac{L + t \text{ctg } \varphi_{\text{зен}}}{n_{\text{зен}} s_o^{\text{зен}}}, \text{ мин};$$

$$I_{\text{зен}} = (i + 1) T_{\text{зен}}, \text{ мин}; \quad Z_{\text{зен}} = \frac{Q_{\text{зен}} + q_3 i_3}{I_{\text{зен}}} \tau_M^{\text{зен}}, \text{ руб/шт.};$$

$$Z_{\text{рез}} > Z_{\text{зен}} \rightarrow \text{зенкер выгоднее}; \quad K_{\text{пл}} = \frac{\tau_M^{\text{рез}} N}{I_{\text{рез}}}, \text{ шт.}; \quad K_{\text{зен}} = \frac{\tau_M^{\text{зен}} N}{I_{\text{зен}}}, \text{ шт.}$$

3.18

$$K_{\text{пл}} = \frac{N}{I_{\text{рез}}} \tau_{\text{м}}^{\text{рез}}, \text{ ШТ.}; K_{\text{зсн}} = \frac{N}{I_{\text{зсн}}} \tau_{\text{м}}^{\text{зсн}}, \text{ ШТ.}$$

3.19

$$B_1 = k_o E_c \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб/мин}; B_2 = 0; B_3 = \frac{Q + q_3 i_3}{i_3 + 1}, \text{ руб. } T_{\text{эк}} = \frac{1 - m}{m} \cdot \frac{B_2 + B_3}{B_1};$$

$$I = (i_3 + 1) T_{\text{эк}}, \text{ мин}; v = \frac{C_v D^{q_v}}{T_{\text{эк}}^m s_o^{y_v}}, \text{ м/мин}; n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин};$$

$$\tau_{\text{м}} = \frac{L + y_1}{v_s} = \frac{L + 0,5D \text{ctg } \varphi}{1000 s_o v} \pi D, \text{ мин}; K = \frac{N}{I} \tau_{\text{м}}, \text{ ШТ.}$$

3.20

$$B'_3 = \frac{(Q + \Delta Q) + q_3 i_3}{i_3 + 1}, \text{ руб.}; T'_{\text{эк}} = \frac{1 - m}{m} \cdot \frac{B_2 + B'_3}{B_1}; I' = (i_3 + 1) T'_{\text{эк}};$$

$$v' = \frac{C_v D^{q_v}}{(T'_{\text{эк}})^m s_o^{y_v}}, \text{ об/мин}; n' = \frac{1000v'}{\pi D}, \text{ об/мин};$$

$$\tau'_{\text{м}} = \frac{L + 0,5D \text{ctg } \varphi}{1000 v' s_o} \pi D, \text{ мин}; K' = \frac{N}{I'} \tau'_{\text{м}}, \text{ ШТ.}$$

3.21

$$B_1 = k_o E_c \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб/мин}; B_2 = 0; B_3 = \frac{Q + q_3 i_3}{i_3 + 1}, \text{ руб.};$$

$$y_1 = \frac{D}{2} \text{ctg } \varphi, \text{ мм}; y_2 = 0; \tau_{\text{м}} = \frac{L + y_1 + y_2}{v_s}, \text{ мин}; T = \frac{B_2 + B_3}{(C/\tau_{\text{м}}) - B_1}, \text{ мин.}$$

3.22

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; y_1 = \frac{D}{2} \text{ctg } \varphi, \text{ мм}; y_2 = 0; \tau_{\text{м}} = \frac{L + y_1 + y_2}{s_o n}, \text{ мин};$$

$$T = 46 \tau_{\text{м}}, \text{ мин}; I = (i_3 + 1) T, \text{ мин.}$$

3.23

$$B_1 = k_o E_c \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб/мин}; B_2 = 0; B_3 = \frac{Q + q_3 i_3}{i_3 + 1}, \text{ руб.};$$

$$T_{\text{эк}} = \frac{1 - m}{m} \cdot \frac{B_2 + B_3}{B_1}, \text{ мин}; s_o = s_z z, \text{ мм/об}; v_{\text{эк}} = \frac{C_v D^{q_v}}{T_{\text{эк}}^m s_o^{y_v}}, \text{ м/мин.}$$

3.24

$$\tau = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \Rightarrow D = \left(\frac{360}{\pi \tau} \right)^2 t, \text{ мм}; n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; s_o = s_z z, \text{ мм/об};$$

$$y_1 = \sqrt{Dt - t^2}, \text{ мм}; \tau_M = \frac{L + y_1}{ns_o}, \text{ мин}; B_3 = \frac{Q + q_3 i_3}{i_3 + 1}, \text{ руб.};$$

$$3 = \frac{\tau_M}{T} B_3 \Rightarrow T = \frac{\tau_M}{3} \cdot \frac{Q + q_3 i_3}{i_3 + 1} = \frac{L + \sqrt{Dt - t^2}}{3 \cdot s_z z} \cdot \frac{\pi D}{1000v} \cdot \frac{Q + q_3 i_3}{i_3 + 1}, \text{ мин.}$$

3.25

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; s_z = \frac{v_s}{nz}, \text{ мм/зуб}; T = \left(\frac{C_v D^{q_v}}{v \cdot t^{x_v} s_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}} \right)^{1/m}, \text{ мин};$$

$$y_1 = \sqrt{Dt - t^2}, \text{ мм}; \tau_M = \frac{L + y_1}{v_s}, \text{ мин}; I = (i_3 + 1)T, \text{ мин}; K = \frac{\tau_M N}{I}, \text{ шт.}$$

3.26

$$3 = \frac{Q + q_3 i_3}{I} \tau_M, \text{ руб/шт}; 3_\Sigma = 3 \cdot N, \text{ руб.}$$

3.27

$$T_{\text{ЭК}} = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_3}{B_1} \Rightarrow B_1 = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_3}{T_{\text{ЭК}}}, \text{ руб/мин};$$

$$C = \frac{\tau_M}{60} \left(B_1 + \frac{B_3}{T} \right) = \frac{\tau_M B_3}{60} \left(\frac{1-m}{m T_{\text{ЭК}}} + \frac{1}{T} \right) \Rightarrow B_3 = \frac{60C}{\tau_M} \left(\frac{1-m}{m T_{\text{ЭК}}} + \frac{1}{T} \right)^{-1}, \text{ руб.};$$

$$Q = B_3 (i_3 + 1) - q_3 i_3 = \frac{60C (i_3 + 1)}{\tau_M} \left(\frac{1-m}{m T_{\text{ЭК}}} + \frac{1}{T} \right)^{-1} - q_3 i_3, \text{ руб.}$$

3.28

$$B_1 = k_o E_c \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб/мин}; B_2 = \tau_n E_n \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб.};$$

$$B_3 = \frac{Q + q_3 i_3}{i_3 + 1}, \text{ руб.}; T_{\text{ЭК}} = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_2 + B_3}{B_1}, \text{ мин.}$$

3.29

$$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T_{\text{ЭК}}^m t^{x_v} s_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}}, \text{ м/мин}; \quad n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин}; \quad s_o = s_z z, \text{ мм/об};$$

$$y_1 = \sqrt{Dt - t^2}, \text{ мм}; \quad \tau_M = \frac{L + y_1}{n s_o}, \text{ мин}; \quad C = \tau_M \left(B_1 + \frac{B_2 + B_3}{T_{\text{ЭК}}} \right), \text{ руб/шт.}$$

3.30

$$T_{\text{ЭК}} = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_3}{B_1} \Rightarrow B_1 = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_3}{T_{\text{ЭК}}}, \text{ руб/мин};$$

$$\tau_M = \frac{L + y_1}{v_s} = \frac{L + t \operatorname{ctg} \varphi}{v_s}, \text{ мин}; \quad C = \tau_M B_3 \left(\frac{1-m}{m T_{\text{ЭК}}} + \frac{1}{T} \right) \Rightarrow$$

$$B_3 = \frac{C}{\tau_M} \left(\frac{1-m}{m T_{\text{ЭК}}} + \frac{1}{T} \right)^{-1}, \text{ руб.}; \quad Q = B_3 i_{\text{ГР}} = \frac{C i_{\text{ГР}} v_s T_{\text{ЭК}}}{L + t \operatorname{ctg} \varphi} \left(\frac{1-m}{m} + \frac{100}{100+k} \right)^{-1}, \text{ руб.}$$

3.31

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм}; \quad l_2 = h(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{tg} \gamma), \text{ мм}; \quad \Delta P_y = n_2 b l_2 = n_2 h t \frac{\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{tg} \gamma}{\sin \varphi}, \text{ Н.}$$

3.32

$$\delta_P = \frac{\Delta P_y}{j} \cos \varphi, \text{ мм}; \quad \Delta = 2(h + \delta_P), \text{ мм.}$$

3.33

$$\delta_P j = N_2 \approx 0,25 b l_2 \sigma_{-B} \Rightarrow l_2 \approx \frac{4 \delta_P j}{b \sigma_{-B}}, \text{ мм}; \quad h = l_2 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \gamma}, \text{ мм}; \quad t = b, \text{ мм};$$

$$A = \pi(D_o - 2b)L, \text{ мм}^2; \quad \tilde{h} = \frac{h}{A} \cdot 10^6 = \frac{4 \cdot 10^6}{\pi} \cdot \frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \delta} \cdot \frac{\delta_P j}{b(D_o - 2b)L \sigma_{-B}}, \text{ мм/мм}^2.$$

3.34

$$A = \pi(D_o - 2t)L, \text{ мм}^2; \quad h = 10^{-6} A \tilde{h}, \text{ мм}; \quad l_2 = h(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{tg} \gamma), \text{ мм};$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм}; \quad N_2 \approx 0,25 b l_2 \sigma_{-B}, \text{ Н}; \quad \delta_P = \frac{N_2}{j}, \text{ мм};$$

$$\Delta = 2(h + \delta_P) = 2 \cdot 10^{-6} \pi L (D_o - 2t) \tilde{h} \left(1 + \frac{t \sigma_{-B} (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{tg} \gamma)}{4 j \sin \varphi} \right), \text{ мм.}$$

3.35

$$\frac{\pi(D-2t)n}{1000} = \frac{100-k}{100} \cdot \frac{\pi Dn}{1000} \Rightarrow t = \frac{kD}{200}, \text{ мм}; s_o = \frac{f}{t} = \frac{200f}{kD}, \text{ мм/об};$$
$$Rz = s_o \frac{\text{tg } \varphi \text{ tg } \varphi_1}{\text{tg } \varphi + \text{tg } \varphi_1} = \frac{200f}{kD} \cdot \frac{\text{tg } \varphi \text{ tg } \varphi_1}{\text{tg } \varphi + \text{tg } \varphi_1}, \text{ мм.}$$

3.36

$$s_o = Rz(\text{ctg } \varphi + \text{ctg } \varphi_1), \text{ мм/об}; n = \frac{1000v}{\pi D_o}, \text{ об/мин}; v_s = ns_o, \text{ мм/мин.}$$

3.37

$$s'_o = \sqrt{8r_B Rz}, \text{ мм/об}; \Delta v_s = \frac{1000v}{\pi D_o} (s'_o - s_o), \text{ мм/мин.}$$

3.38

$$Rz = s_o \frac{\text{tg } \varphi \text{ tg } \varphi_1}{\text{tg } \varphi + \text{tg } \varphi_1} \Rightarrow \varphi_1 = \text{arctg} \frac{Rz \text{ tg } \varphi}{s_o \text{ tg } \varphi - Rz}, \text{ град};$$
$$\varphi' = \varphi - \frac{\varphi_{\text{конус}}}{2}; \varphi'_1 = \varphi_1 + \frac{\varphi_{\text{конус}}}{2}; Rz' = s_o \frac{\text{tg } \varphi' \text{ tg } \varphi'_1}{\text{tg } \varphi' + \text{tg } \varphi'_1}, \text{ мм.}$$

3.39

$$\varphi = 90^\circ - \varphi_1; \frac{\text{ctg } \varphi_1 \text{ tg } \varphi_1}{\text{ctg } \varphi_1 + \text{tg } \varphi_1} = \frac{\text{tg } \varphi_1}{1 + \text{tg}^2 \varphi_1} = \frac{1}{2} \sin 2\varphi_1, \text{ град};$$
$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2Rz[\text{мм}]}{s_o}, \text{ град.}$$

3.40

$$s_o = \frac{\Pi}{vt}, \text{ мм/об}; r_B = \frac{s_o^2}{8Rz[\text{мм}]}, \text{ мм.}$$

3.41

$$v = \frac{\pi D_o n}{1000}, \text{ м/мин}; s_o = \left(\frac{C_v}{T^m t^{x_v} v} \right)^{1/y_v}, \text{ мм/об}; r_B = \frac{s_o^2}{8Rz}, \text{ мм.}$$

3.42

$$S_o = Rz(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1), \text{ мм/об}; \quad b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм}; \quad a = s_o \sin \varphi, \text{ мм};$$

$$W_3 = \frac{P_z v}{60} \Rightarrow v = \left(\frac{60 W_3}{C_{pz} b a^{0,75}} \right)^{1/(1+z_{pz})}, \text{ м/мин}; \quad n = \frac{1000 v}{\pi D_o}, \text{ об/мин};$$

$$\tau_m = \frac{L + t(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1)}{n s_o}, \text{ мин.}$$

3.43

$$Rz = s_{o1} \frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{s_{o2}^2}{8 r_B} \Rightarrow s_{o2}, \text{ мм/об}; \quad v_1 = \frac{C_v}{T_1^m t^{x_v} s_{o1}^{y_v}}; \quad v_2 = \frac{C_v}{T_2^m t^{x_v} s_{o2}^{y_v}}, \text{ м/мин};$$

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{\Delta T}{100} \right), \text{ мин}; \quad v_{s1} = n_1 s_{o1} = \frac{1000 v_1}{\pi D_o} s_{o1}; \quad v_{s2} = \frac{1000 v_2}{\pi D_o} s_{o2}, \text{ мм/мин};$$

$$\Delta v_s = \frac{v_{s2} - v_{s1}}{v_{s1}} \cdot 100 \% = \left(\frac{v_2 s_{o2}}{v_1 s_{o1}} - 1 \right) \cdot 100 \% = \left(\left(1 + \frac{\Delta T}{100} \right)^{-m} \left(\frac{s_{o2}}{s_{o1}} \right)^{1-y_v} - 1 \right) \cdot 100 \%.$$

3.44

$$P_N = \frac{P_x}{\sin \varphi}, \text{ Н}; \quad b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм}; \quad f_1 = \frac{P_N}{b l_1} = \frac{C_{px} s_o^{y_{px}} v^{z_{px}}}{l_1}, \text{ МПа};$$

$$n_T = \frac{20 H_R}{\sqrt{\sigma_B^2 + 3,16 f_1^2}}.$$

3.45

$$\gamma = 90 - \delta; \quad \varphi = 90^\circ \rightarrow P_N = P_y; \quad f_1 = \frac{P_z \sin \gamma + P_y \cos \gamma}{b l_1}, \text{ МПа};$$

$$n_T = \frac{20 H_R}{\sqrt{\sigma_B^2 + 3,16 f_1^2}}.$$

3.46

$$P_N = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \text{ Н}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{P_x}{P_y}; \quad b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм};$$

$$f_1 = \frac{P_z \sin \gamma + P_N \cos \gamma}{b l_1}, \text{ МПа}; \quad n_T = \frac{20 H_R}{\sqrt{\sigma_B^2 + 3,16 f_1^2}}.$$

3.47

$$n_T = \frac{20H_R}{\sqrt{\sigma_B^2 + 3,16f_1^2}} \Rightarrow f_1 = \frac{1}{n_T} \sqrt{\frac{400H_R^2 - n_T^2\sigma_B^2}{3,16}} = \frac{P_z \sin \gamma + P_N \sqrt{1 - \sin^2 \gamma}}{bl_1} \Rightarrow$$

$$(P_z^2 + P_N^2) \sin^2 \gamma - 2f_1 bl_1 P_z \sin \gamma + (f_1 bl_1)^2 - P_N^2 = 0; \sin \gamma \rightarrow \text{из уравнения.}$$

3.48

$$s_o = Rz(\text{ctg} \varphi + \text{ctg} \varphi_1), \text{ мм/об}; b = \frac{f}{s_o \sin \varphi}, \text{ мм};$$

$$P_z = 0,9ab\sigma_B \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right) \Rightarrow s_o = Rz(\text{ctg} \varphi + \text{ctg} \varphi_1), \text{ мм/об}; b = \frac{f}{s_o \sin \varphi}, \text{ мм};$$

$$P_z = 0,9ab\sigma_B \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right) \Rightarrow \sigma_B = \frac{P_z}{0,9f} \left(\frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + 1 \right)^{-1};$$

$$f_1 = \frac{P_z \sin \gamma + P_N \cos \gamma}{bl_1}, \text{ МПа}; n_T = \frac{20H_R}{\sqrt{\sigma_B^2 + 3,16f_1^2}}.$$

3.49

$$s_o = \sqrt{8r_B Rz}, \text{ мм/об}; b = \frac{f}{s_o \sin \varphi}, \text{ мм};$$

$$f_1 = \frac{P_z \sin \gamma + P_N \cos \gamma}{bl_1}, \text{ МПа}; n_T = \frac{20H_R}{\sqrt{\sigma_B^2 + 3,16f_1^2}}.$$

3.50

$$B_1 = k_o E_c \left(1 + \frac{HP}{100} \right), \text{ руб/мин}; B_2 = 0; B_3 = \frac{Q}{i_{TP}}, \text{ руб.}; T_{\text{эк}} = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{B_2 + B_3}{B_1}, \text{ мин};$$

$$v = \frac{C_v}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s_o^{y_v}} \Rightarrow t = \left(\frac{C_v}{v T_{\text{эк}}^m s_o^{y_v}} \right)^{1/x_v}, \text{ мм};$$

$$P_N = \frac{P_x}{\sin \varphi}, \text{ Н}; b = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм}; f_1 = \frac{P_N}{bl_1} = \frac{P_x}{tl_1}, \text{ МПа}; n_T = \frac{20H_R}{\sqrt{\sigma_B^2 + 3,16f_1^2}}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. Грановский, Г. И. Резание металлов : учебник для вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва : Высшая школа, 1985. – 303, [1] с.
3. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – Москва : Машиностроение, 1982. – 320 с.
4. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1976. – 278 с. – (Библиотека технолога).
5. Развитие науки о резании металлов / редкол.: Н. Н. Зорев (пред.) [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1967. – 416 с.

Основные размеры конусов Морзе

Конус Морзе	Конусность ρ	Диаметр в основной плоскости, мм	Характеристика \bar{d}/ρ , мм
0	1:19,212	9,045	158
1	1:20,047	12,065	220
2	1:20,020	17,780	324
3	1:19,922	23,825	432
4	1:19,254	31,267	547
5	1:19,002	44,399	767
6	1:19,180	63,348	1105

Ответы на задачи

Глава 1

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.01. 42°; | 1.02. 22°; |
| 1.03. 171 мм/мин; | 1.04. 200 мм/мин; |
| 1.05. 275 мм/мин; | 1.06. 191 мм/мин; |
| 1.07. 0,15 мм; | 1.08. 3 зуба; |
| 1.09. 1,5 мм ² ; | 1.10. 32 м/мин; |
| 1.11. 40 м/мин; | 1.12. 208 мм/мин; |
| 1.13. 20 мм; | 1.14. 200 мм/мин; |
| 1.15. 45 м/мин; | 1.16. 250 мм/мин; |
| 1.17. 7 мм; | 1.18. 90 мм; |
| 1.19. 280 мм/мин; | 1.20. 2 зуба; |
| 1.21. $z \in [13; 25]$; | 1.22. 14,5 мм ² ; |
| 1.23. 2 мм ² ; | 1.24. 5 мм ² ; |
| 1.25. 3,5 мм ² ; | 1.26. 3 шт.; |
| 1.27. 5 шт.; | 1.28. 3 шт.; |
| 1.29. 18°; | 1.30. 8 мм ² ; |
| 1.31. 1 мин; | 1.32. 4 мм; |
| 1.33. 0,5 мин; | 1.34. возрастет на 10 %; |
| 1.35. 0,2 мин; | 1.36. 1,4 мин; |
| 1.37. 0,5 мин; | 1.38. 0,2 мин; |
| 1.39. на 40 %; | 1.40. на 2 мм; |
| 1.41. 98 мм; | 1.42. 0,3 мин; |
| 1.43. 31°; | 1.44. 2 мин; |
| 1.45. уменьшится на 5 %; | 1.46. увеличится на 80 %; |
| 1.47. 85 мм; | 1.48. да ($k = 2$); |
| 1.49. 8 мм; | 1.50. 16 зубьев. |

Глава 2

- 2.01. 54 м/мин; 2.02. 40 м/мин;
2.03. 45 м/мин; 2.04. 189 %;
2.05. 141 %; 2.06. 256 %;
2.07. 110°; 2.08. 24 м/мин;
2.09. 700 МПа; 2.10. 500 МПа;
2.11. 10 кН; 2.12. 1 мм;
2.13. 0,2 мм; 2.14. $f_1 = 860$ МПа; $f_2 = 400$ МПа;
2.15. 6 кН; 2.16. 76 Н · м;
2.17. на 15 %; 2.18. 25 м/мин;
2.19. 9095 Н и 5830 Вт; 2.20. 3100 Вт;
2.21. 250 %; 2.22. невозможно ($\arctg(P_N / P_2) = 10^\circ$);
2.23. возможно ($\arctg(P_N / P_2) = 8^\circ$); 2.24. 4°;
2.25. 4600 Вт; 2.26. 50°;
2.27. 5520 Вт; 2.28. 375 об/мин;
2.29. достаточно ($P_T > 3220$ Н); 2.30. 5 кН;
2.31. 100 мм; 2.32. в 2 раза;
2.33. $M = 15$ Н · м; $P_{oc} = 250$ Н; 2.34. 1,2 мм/об;
2.35. 20 Н · м; 2.36. 2900 Н;
2.37. 500 Н · м; 2.38. 70 %;
2.39. 96 %; 2.40. 55 %;
2.41. 5 кВт; 2.42. 9822 Н;
2.43. 6476 Н; 2.44. невозможно ($W_3 = 4790$ Вт);
2.45. 400 Н · м; 2.46. конус Морзе 0 ($\bar{d} / \rho > 150$);
2.47. 0,5 мм/зуб; 2.48. 160 об/мин;
2.49. $\sigma_1 = 150$ МПа; $\sigma_0 = 100$ МПа; 2.50. 50 мм.

Глава 3

- 3.01. 0,9 мм;
3.03. $\alpha \geq 7^\circ$;
3.05. 20 мм/м²;
3.07. уменьшить на 13 %;
3.09. 41 мин;
3.11. 20 мм;
3.13. 25 мин;
3.15. 302 об/мин;
3.17. целесообразно
($Z_{рез} = 0,43$ руб/шт;
 $Z_{зен} = 0,40$ руб/шт);
3.19. 5 шт.;
3.21. 28 мин;
3.23. 14 м/мин;
3.25. 4 шт.;
3.27. 3000 руб.;
3.29. 19 руб/шт;
3.31. на 1200 Н;
3.33. 5 мм/м²;
3.35. 0,15 мм;
3.37. на 120 мм/мин;
3.39. 15°;
3.41. 0,8 мм;
3.43. на 64 %;
3.45. 1,3;
3.47. 1;
3.49. уменьшится на 0,4;
- 3.02. 1 мм;
3.04. 2 мм/м²;
3.06. 0,05 мм;
3.08. 72 см³/мин;
3.10. 0,3 мм/зуб;
3.12. 40 м/мин;
3.14. 10 шт.;
3.16. 5 руб/шт;
3.18. 14 пластин или 2 зенкера;
3.20. 4 шт.;
3.22. 5 ч;
3.24. 30 мин;
3.26. 17 600 руб.;
3.28. 90 мин;
3.30. 400 руб.;
3.32. на 0,3 мм;
3.34. на 0,2 мм;
3.36. 133 мм/мин;
3.38. 50 мкм;
3.40. 1 мм;
3.42. 2 мин;
3.44. 2,5;
3.46. 2,4;
3.48. 1,9;
3.50. 2,0.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Кинематика процесса резания и сечение среза при работе лезвийным инструментом	5
Глава 2. Деформации и силы при резании лезвийным инструментом	25
Глава 3. Формоизменение лезвийного инструмента в процессе резания	48
Глава 4. Для самоконтроля студентов. Алгоритмы решения задач	72
Библиографический список	96
Приложение 1	97
Приложение 2	98

Учебное издание

Резников Лев Аронович

ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Задачник

Редактор *Т.М. Воропанова*

Технический редактор *Н.П. Крюкова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *И.И. Шишкина*

*При оформлении обложки использовано
изображение от freepik (сайт ru.freepik.com)*

Подписано в печать 11.12.2025. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 5,92.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-01-25.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru