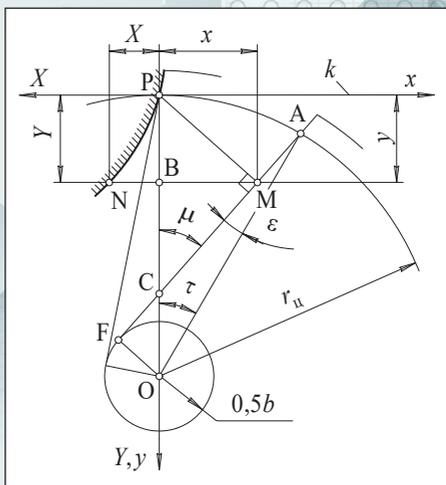


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

Л.А. Резников

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО МЕТОДОМ ОБКАТКИ

Электронное
учебное пособие



© Резников Л.А., 2024

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2024

ISBN 978-5-8259-1641-5

УДК 621.91.02(075.8)
ББК 34.630.6-56-02я73

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент, начальник конструкторско-технологического
отдела ООО «НПП АВИС» *Д.Е. Салабаев*;

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование
и технологии машиностроительного производства»

Тольяттинского государственного университета *А.А. Козлов*.

Резников, Л.А. Инструментальные системы автоматизированного машиностроения. Основы проектирования режущего инструмента, работающего методом обкатки : электронное учебное пособие / Л.А. Резников. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2024. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1641-5.

В пособии изложены общие принципы и теоретические основы проектирования режущего инструмента, предназначенного для изготовления поверхностей сложной формы: зубчатых колес, деталей шлицевых соединений и др. Дан обзор и сравнительные характеристики современных инструментальных материалов и методов модификации их поверхностных свойств.

Предназначено для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (очная форма обучения).

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader; интернет-браузер.

© Резников Л.А., 2024

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2024

Учебное издание

Резников Лев Аронович

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ.
ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА,
РАБОТАЮЩЕГО МЕТОДОМ ОБКАТКИ

Редактор *О.И. Елисеева*

Технический редактор *Н.П. Крюкова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Художественное оформление,

компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

В оформлении пособия использовано изображение
от [kjpargeter](https://www.freepik.com) на сайте [ru.freepik.com](https://www.freepik.com)

Дата подписания к использованию 09.07.2024.

Объем издания 2,2 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-07-24.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
1. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
В МАШИНОСТРОЕНИИ	7
1.1. Инструментальные стали	9
1.2. Металлокерамические твердые сплавы	13
1.3. Неметаллические инструментальные материалы	16
Выводы	19
Вопросы для самоконтроля	20
2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ	
ОБКАТНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ	21
2.1. Основные правила обкатки	21
2.2. Классификация инструментов, работающих	
методом обкатки	23
Выводы	24
Вопросы для самоконтроля	24
3. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ	
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС, РАБОТАЮЩИЕ ПО СХЕМЕ	
«РЕЙКА – КОЛЕСО»	25
3.1. Зубострогальные гребенки	25
3.2. Червячные фрезы для нарезания зубчатых колес	32
Выводы	39
Вопросы для самоконтроля	40
4. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ	
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС, РАБОТАЮЩИЕ ПО СХЕМЕ	
«КОЛЕСО – КОЛЕСО»	41
4.1. Зуборезные долбяки	41
4.2. Шеверы	54
Выводы	57
Вопросы для самоконтроля	58

5. ЧЕРВЯЧНЫЕ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБКАТКИ	
НЕЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ	59
5.1. Исходные данные для проектирования фрез	59
5.2. Построение линии профилирования	61
5.3. Определение радиуса центроиды валика	64
5.4. Построение профиля зуба фрезы	65
5.5. Особенности проектирования фрез для обработки шлицевых валов с различным центрированием	67
Выводы	71
Вопросы для самоконтроля	71
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	 73
 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	 75
 ГЛОССАРИЙ	 78

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Инструментальные системы автоматизированного машиностроения» — одна из основных профилирующих дисциплин, изучаемых студентами, обучающимися по направлению подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства» (магистерские программы «Передовые технологии машиностроительных производств» и «Цифровые процессы и системы автоматизированного машиностроения»). Знания и умения, полученные студентами при изучении приемов проектирования режущего инструмента, используются ими при подготовке и защите магистерской диссертации.

В ходе преподавания этой дисциплины важно донести до обучающихся теоретические основы проектирования режущего инструмента, используемого в современном автоматизированном машиностроительном производстве, и научить их решать задачи, близкие к реальным конструкторским задачам.

Достижению этой цели призвано помочь настоящее пособие, в котором подробно рассмотрены теоретические аспекты конструирования высокопроизводительных режущих инструментов, работающих методом обкатки, и даны рекомендации по выбору целесообразных параметров этих инструментов.

1. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В рамках этого раздела будет проведено сравнение инструментальных материалов по следующим основным характеристикам, влияющим на работоспособность и экономичность режущего инструмента:

- твердость;
- прочность;
- термостойкость;
- технологичность;
- относительная стоимость.

Твердость закаленных инструментальных сталей и твердых сплавов измеряют по Роквеллу (HR), а сверхтвердых материалов – по Виккерсу (HV).

Основными показателями **прочности** материалов служат предельно допустимые напряжения изгиба $\sigma_{\text{и}}$, растяжения $\sigma_{\text{в}}$ или сжатия $\sigma_{-\text{в}}$.

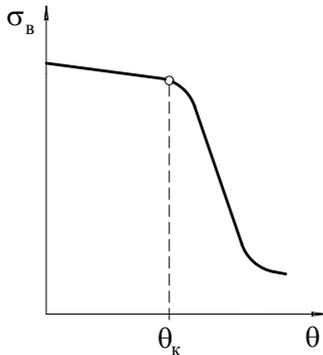


Рис. 1. Зависимость предела прочности материала от температуры испытаний

Под **термостойкостью** инструментальных материалов понимают их способность сохранять физико-механические характеристики (в частности прочность) при повышении температуры (рис. 1). Вначале с возрастанием температуры до некоторого критического значения $\theta_{\text{к}}$ величина $\sigma_{\text{в}}$ снижается достаточно медленно. При $\theta > \theta_{\text{к}}$

темп падения прочности резко возрастает, а затем величина σ_v вновь стабилизируется, но на значительно меньшем, чем первоначальный, уровне.

Для нормальной работы инструмента необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\theta_k \geq \theta_p, \quad (1.1)$$

где θ_p — температура резания.

Заметим, что у сталей и литых сплавов температуру θ_k называют *краснотой* материала.

Технологичность таких инструментальных материалов, как твердые сплавы и минералокерамика, характеризуется, в первую очередь, их способностью к обработке шлифованием. Для инструментальных сталей помимо шлифуемости важным показателем технологичности является уровень деформаций при термообработке инструмента (например, искривление оси сверла после его закалки), поскольку мероприятия по устранению этих деформаций увеличивают время изготовления инструмента и его стоимость.

Главным экономическим показателем инструментального материала является так называемая **относительная стоимость** изготовленного из этого материала инструмента

$$p = \frac{Q}{A\Pi}, \text{ руб./см}^3, \quad (1.2)$$

где Q — стоимость инструмента, руб.; A — полный период стойкости (срок службы) инструмента, мин; Π — производительность процесса резания при работе данным инструментом, $\text{см}^3/\text{мин}$.

Как следует из формулы (1.2), относительная стоимость характеризует расходы по линии инструмента на съём единицы объема обрабатываемого материала. Чем выше величина p , тем хуже экономическая характеристика инструментального материала. Пусть, например, относительные стоимости двух инструментальных материалов соотносятся как 1:2. Это означает, что при одинаковой стоимости инструментов и одинаковых сроках их службы инструмент из первого материала может работать со вдвое большей производительностью, чем инструмент из второго материала.

В современном машиностроительном производстве используют три группы инструментальных материалов:

- стали;
- твердые сплавы;
- неметаллы.

1.1. Инструментальные стали

Стали появились в производстве раньше других инструментальных материалов и в следующем хронологическом порядке:

- углеродистые;
- легированные;
- быстрорежущие.

Маркировка **углеродистых инструментальных сталей** содержит два обязательных элемента: букву **У** и число, показывающее среднее содержание углерода в десятых долях процента. Маркировка может содержать и два дополнительных элемента (табл. 1): букву **А**, которая указывает на пониженное содержание серы и фосфора (элементов, увеличивающих хрупкость стали), и букву **Г**, которая указывает на повышенное содержание марганца (элемента, улучшающего прокаливаемость стали и повышающего ее ударную вязкость).

Таблица 1

Химический состав углеродистых инструментальных сталей

Марка стали	Содержание элемента, %					
	углерод	кремний	марганец	сера	фосфор	хром, медь, никель
У8	0,76...0,83	0,17...0,33	0,17...0,33	до 0,028	до 0,030	до 0,2 каждого
У8Г			0,33...0,58			
У8ГА				до 0,018	до 0,025	
У10			до 0,028	до 0,030		
У12А			до 0,018	до 0,025		

Инструменту из углеродистых сталей при закалке можно придать достаточно высокую твердость (HRC₃ 62...64).

Прочность углеродистых сталей средняя ($\sigma_{\text{в}} \approx \sigma_{\text{и}} = 2,8...3,0$ ГПа). С увеличением содержания углерода возрастает хрупкость материала.

Углеродистые стали имеют низкую красностойкость (200...250 °С) и высокую технологичность (хорошо обрабатываются шлифованием). Из-за низкой красностойкости эти стали используют для изготовления инструмента, который работает в условиях, не вызывающих сильного разогрева режущих кромок: ручных метчиков, напильников, ножовочных полотен. Такой инструмент является очень низкопроизводительным, поэтому, как следует из формулы (1.2), имеет высокую относительную стоимость.

Маркировка **легированных инструментальных сталей** (табл. 2) начинается с цифры, указывающей количество углерода в десятых долях процента. Если эта цифра отсутствует, массовая доля углерода в стали около 1 %. Далее маркировка содержит буквенно-цифровые пары, которые указывают легирующие элементы и их содержание в процентах. Если массовая доля легирующего элемента не превышает 1 %, цифра в маркировке не ставится. Например, сталь 9Г2Ф содержит 0,9 % углерода, 2 % марганца и около 1 % ванадия.

Таблица 2

Химический состав легированных инструментальных сталей

Марка стали	Содержание элемента, %					
	углерод	кремний	марганец	хром	вольфрам	ванадий
9ХС	0,85...0,95	1,2...1,6	0,3...0,6	0,9...1,2	—	—
ХВГ	0,90...1,05	0,1...0,4	0,8...1,1	0,9...1,2	1,2...1,6	—
11ХФ	1,05...1,15		0,4...0,7	0,4...0,7	—	0,1...0,3
В2Ф	1,05...1,22		0,1...0,4	—	1,6...2,0	
ХВ4Ф	1,25...1,45			0,4...0,7	3,5...4,3	

Хром упрочняет сталь в результате его растворения в железной основе и образования карбидов. Вольфрам повышает твердость за счет образования сложных карбидов, увеличивает износостойкость и термостойкость стали. Ванадий уменьшает рост зерна при нагреве, улучшает свариваемость, но ухудшает шлифуемость материала. Молибден уменьшает склонность стали к отпускной хрупкости, повышает прокаливаемость, придает повышенную прочность, пластичность и вязкость. Кремний улучшает прокаливаемость стали, снижает ее чувствительность к перегреву.

Легированные и углеродистые инструментальные стали имеют близкие массовые доли углерода, поэтому их твердости в закаленном состоянии соизмеримы. Легирующие элементы, однако, улучшают закалочную структуру (в частности делают ее мелкозернистой), что обеспечивает более высокую прочность легированной стали ($\sigma_{-в} \approx \sigma_{и} = 3,0...3,2$ ГПа).

Технологичность легированных сталей высокая. Они хорошо шлифуются и имеют малые деформации при термообработке.

Легированные инструментальные стали обладают средней термостойкостью (350...400 °С) и используются для изготовления инструмента, работающего с низкими скоростями резания: ленточных пил, мелкоразмерных сверл, зенкеров, протяжек и метчиков.

Относительная стоимость инструмента из легированной стали средняя.

В современном машиностроении около 60 % инструмента изготавливается из **быстрорежущих сталей**, легированных вольфрамом, молибденом, кобальтом и ванадием в больших количествах (до 25 %).

Принцип маркировки быстрорежущих сталей (табл. 3) такой же, как у легированных инструментальных, за исключением двух отличий:

- 1) следом за массовой долей углерода ставится буква **Р** (от лат. *rapid* – быстрый);
- 2) после буквы Р указывается процентное содержание вольфрама.

Например, быстрорежущая сталь Р9М4К8 содержит около 1 % углерода, 9 % вольфрама, 4 % молибдена и 8 % кобальта.

Таблица 3

Химический состав быстрорежущих сталей

Марка стали	Содержание элемента, %					
	углерод	вольфрам	ванадий	кобальт	молибден	хром
P18	0,73...0,83	17,0...18,5	1,0...1,4	до 0,5	до 1,0	3,8...4,4
P12Ф3	0,95...1,05	12,0...13,0	2,5...3,0			
P10Ф5K5	1,45...1,55	10,0...11,5	4,3...5,1	5,0...6,0		4,0...4,6
P9K10	0,90...1,00	9,0...10,5	2,0...2,6	9,0...10,5		3,8...4,4
P6M5	0,82...0,90	5,5...6,5	1,7...2,1	до 0,5	4,8...5,3	

Введение пяти и более процентов кобальта в состав стали значительно повышает ее твердость (до $HRC_{\text{с}}$ 66...68) и термостойкость (до 640...650 °С). Стали, не содержащие такого количества кобальта, обладают твердостью $HRC_{\text{с}}$ 64...66 и термостойкостью 600...620 °С.

Прочность закаленных быстрорежущих сталей несколько выше, чем других инструментальных сталей ($\sigma_{\text{в}} \approx \sigma_{\text{и}} = 3,2...3,5$ ГПа).

Из быстрорежущих сталей наилучшей шлифуемостью обладает P18. Шлифуемость остальных сталей тем выше, чем больше в них массовая доля вольфрама и меньше массовая доля ванадия. Например, шлифуемость стали P12Ф3 в 2...3 раза, а стали P10Ф5K5 – в 4...5 раз ниже шлифуемости P18.

Из быстрорежущих сталей изготавливают практически всю номенклатуру сложнопрофильного инструмента (фасонные резцы, протяжки, червячные фрезы, долбяки и т. д.) и инструмент общего назначения (свёрла, развертки, метчики, цилиндрические фрезы и т. д.), работающий со скоростями резания до 100 м/мин.

Относительная стоимость инструмента из быстрорежущих сталей средняя из-за высокой стоимости вольфрамосодержащих материалов.

1.2. Металлокерамические твердые сплавы

Твердые сплавы являются основным инструментальным материалом, обеспечивающим высокопроизводительную обработку резанием. В настоящее время доля твердосплавного инструмента, применяемого в машиностроении, составляет до 30 %, причем производительность обработки этим инструментом в 2...5 раз выше, чем быстрорежущим.

Твердые сплавы получают методом порошковой металлургии — спеканием под давлением зерен карбидов вольфрама WC, титана TiC и тантала TaC в металлической (кобальтовой) связке.

Твердые сплавы подразделяют:

- на однокарбидные (WC);
- двухкарбидные (WC + TiC);
- трехкарбидные (WC + TiC + TaC).

Маркировка **однокарбидных** твердых сплавов содержит три обязательных элемента: буквы **В** (карбид вольфрама), **К** (кобальтовая связка) и число, показывающее содержание кобальта в процентах. Маркировка может иметь и один дополнительный элемент: буквы **В**, **М** и **ОМ**, которые указывают на крупно-, мелко- и особомелкозернистую структуру сплава соответственно. Например, ВК10-М — это мелкозернистый твердый сплав, содержащий 90 % карбида вольфрама и 10 % кобальтовой связки.

Физико-механические характеристики зависят от объема связки и от зернистости структуры. Из табл. 4 видно, что увеличение объема связки повышает прочность сплава и снижает его твердость, а из табл. 5 — что увеличение размера зерна снижает прочность при сжатии, а также твердость сплава.

Маркировки двух- и трехкарбидных сплавов начинаются с букв **Т** или **ТТ**, рядом с которыми указывается соответственно содержание карбида титана или суммарное содержание TiC и TaC в процентах. Указание на зернистость структуры у этих сплавов, как правило, отсутствует. Например, Т5К10 — это двухкарбидный сплав, содержащий 85 % карбида вольфрама, 5 % карбида титана и 10 % кобальтовой связки, а сплав ТТ7К12 — трехкарбидный, содержащий 81 % карбида вольфрама, 7 % карбидов титана и тантала и 12 % кобальта.

Таблица 4

**Физико-механические характеристики однокарбидных
твердых сплавов**

Марка сплава	$\sigma_{и}$, МПа	HRA
ВК3	1176	89,5
ВК6	1519	88,5
ВК8	1666	87,5
ВК10	1764	87,0
ВК20	2058	84,0

Таблица 5

Влияние размера зерна WC на характеристики твердого сплава ВК6

Марка сплава	Размер зерна, мкм	$\sigma_{и}$, МПа	$\sigma_{-в}$, МПа	HRA
ВК6-ОМ	1,3	1270	—	90,5
ВК6-М	1,6	1421	4910	90,0
ВК6	2,0	1519	4390	88,5
ВК6-В	3,3	1660	3680	87,5

Таблица 6

**Физико-механические характеристики двух-
и трехкарбидных сплавов**

Марка сплава	$\sigma_{и}$, МПа	HRA	Марка сплава	$\sigma_{и}$, МПа	HRA
T5K10	1421	88,5	ТТ7К12	1666	87,0
T14K8	1274	89,5	ТТ8К6	1323	90,5
T15K6	1176	90,0	ТТ10К8	1617	89,0
T30K4	980	92,0	ТТ20К9	1470	91,0

Как следует из табл. 4 и 6, спечённые сплавы имеют твердость HRA 84...92 (HRC₃ 73...76), которая существенно выше твердости инструментальных сталей. Прочность на сжатие этих сплавов ($\sigma_{-в} = 3,5...5,0$ ГПа) также превосходит аналогичную характеристику сталей, а вот средняя прочность на изгиб ($\sigma_{и} = 1,2...1,6$ ГПа) заметно уступает изгибной прочности сталей. Именно поэтому инструмент, оснащенный твердыми сплавами, лучше работает при отрицательных передних углах, когда режущее лезвие находится в условиях сжатия.

Твердые сплавы имеют высокую термостойкость: однокарбидные – около 800 °С, а поликарбидные – до 1000 °С. Это позволяет использовать скорости резания в 5...10 раз выше, чем при работе быстрорежущим инструментом, и обеспечивает низкую относительную стоимость твердосплавного инструмента.

Твердые сплавы шлифуются хуже инструментальных сталей. Однако основные технологические проблемы при изготовлении инструмента из твердых сплавов заключаются не в этом, а в высокой трудоемкости (подчас невозможности) спекания однородных по структуре изделий сложной формы.

Твердосплавные пластины с механическим креплением используют для оснащения крупноразмерного инструмента. Инструмент средних размеров оснащают напайными пластинами, а мелкоразмерный инструмент (например свёрла) целиком изготавливают из твердосплавных заготовок. Подробные рекомендации по применению твердых сплавов для обработки материалов резанием приведены в ГОСТ 3882–74.

Дефицитность и высокая стоимость вольфрама привели к созданию и внедрению в производство **безвольфрамовых** твердых сплавов (БВТС) на основе карбида титана TiC и карбонитрида титана TiCN с никелем и молибденом в качестве связки.

Сплавы на основе TiC с никелевой связкой имеют в маркировке буквы **ТН**, а сплавы на основе TiCN – буквы **КНТ**. Цифры в маркировках не означают каких-либо массовых долей, а являются условным номером.

У всех БВТС массовая доля связки 25...30 %. Остальную массу сплава составляют соответствующие неметаллы. Например, сплав ТН-20 содержит 79 % карбида титана, 15 % никеля и 6 % молибдена.

Из табл. 7 видно, что по твердости и прочности на изгиб эти сплавы не уступают вольфрамосодержащим сплавам.

Таблица 7

Физико-механические характеристики безвольфрамовых
твердых сплавов

Марка сплава	$\sigma_{и}$, МПа	HRA
ТН-20	1050	90,0
КТН-16	1200	89,0
КТН-20	1550	90,0
КТН-30	1700	88,5

Термостойкость безвольфрамовых сплавов около 800 °С.

Инструменты из безвольфрамовых твердых сплавов работают по сталям практически без наростообразования, что и определяет область их применения (чистовое и получистовое точение и фрезерование малолегированных, углеродистых сталей, чугуна и цветных сплавов).

Основной технологический недостаток БВТС – они плохо поддаются пайке (теряют режущие свойства при нагреве на установках ТВЧ) и поэтому могут применяться только в виде сменных непереключаемых пластин.

1.3. Неметаллические инструментальные материалы

К неметаллическим инструментальным материалам относят:

- режущую керамику;
- природный алмаз;
- синтетические сверхтвердые материалы (СТМ).

Поиски инструментальных материалов, не содержащих дефицитные элементы, привели к созданию в начале 50-х годов XX века минералокерамических режущих пластин на основе окиси алюминия.

В настоящее время промышленность выпускает четыре разновидности **режущей керамики**:

- оксидную (на основе Al_2O_3);
- оксикарибидную (на основе композиции $Al_2O_3 - TiC$);

- оксидонитридную (на основе композиции $Al_2O_3 - TiN$);
- нитридную (на основе нитрида кремния Si_3N_4).

Единой маркировки режущей керамики не существует.

Таблица 8

Состав и свойства режущей керамики

Вид керамики	Марка	Содержание элементов	$\sigma_{и}$, МПа	HRA
Оксидная	ЦМ-332	99 % Al_2O_3 + 1 % MgO	300...350	91
	ВШ-75	Al_2O_3	250...300	92
Оксикарбидная	В-3	60 % Al_2O_3 + 40 % TiC	600	94
	ВОК-63		650...700	
Оксидонитридная	Кортинит	70 % Al_2O_3 + 30 % TiN	640	92
Нитридная	Силинит-Р	Si_3N_4 + Y_2O_3 + TiC	700...800	94

Основным отличием режущей керамики от твердых сплавов является отсутствие связующей фазы, вследствие чего степень разупрочнения керамики при нагреве существенно ниже (термостойкость ~ 1200 °С).

Как видно из табл. 8, твердость керамики несколько выше, чем у металлокерамических сплавов, а прочность на изгиб – самая низкая из всех рассмотренных инструментальных материалов.

Сочетание высокой термостойкости с низкой прочностью предопределяет область применения минералокерамики: оснащение инструмента, работающего с высокими скоростями резания (до 900...1000 м/мин) при малом сечении среза (чистовые операции) в отсутствие ударных нагрузок. Керамику на основе Al_2O_3 нельзя применять при обработке алюминия и алюминиевых сплавов из-за химического средства с ними.

Режущая керамика плохо поддается заточке (из-за твердости, соизмеримой с твердостью абразивов), поэтому производится в виде сменных неплетачиваемых пластин.

Относительная стоимость минералокерамических пластин низкая – из-за весьма низкой стоимости сырья.

Природный алмаз в виде монокристаллов массой 0,3...1,0 карата (то есть размером 3...4 мм по ребру условного куба) применяют при тонком и чистовом точении заготовок из цветных металлов и сплавов. Использование алмаза для обработки сталей невозможно из-за химического сродства по углероду. Инструмент, оснащенный кристаллами природного алмаза, используют в прецизионном машиностроении и приборостроении для получения зеркально чистых поверхностей оптических деталей, дисков памяти, барабанов копировальной техники и т. п.

Природный алмаз имеет наивысшую твердость среди всех известных материалов (HV 98 000, для сравнения, твердость карбида вольфрама HV 17 500), среднюю прочность на сжатие ($\sigma_{-в} = 1960$ МПа) и очень низкую – на изгиб ($\sigma_{и} = 290$ МПа).

Термостойкость природного алмаза около 800 °С. При превышении этой температуры алмаз полностью и необратимо теряет режущие свойства, превращаясь в графит.

Технологичность природного алмаза очень низкая, а относительная стоимость инструмента, оснащенного монокристаллами алмаза, высокая (из-за низкой производительности тонкого точения).

Синтетические сверхтвердые материалы, используемые для оснащения лезвийного режущего инструмента, представляют собой поликристаллы синтетического алмаза, получаемого из углерода, или кубического нитрида бора (КНБ) – материала, не имеющего природного аналога.

Единой маркировки СТМ не существует.

Из табл. 9 видно, что поликристаллы СТМ на основе синтетического алмаза отличаются от монокристаллов природного алмаза большей прочностью. В связи с этим их можно использовать для оснащения фрез и токарных резцов, обрабатывающих прерывистые поверхности. Однако, как показывает практика, наиболее эффективно применение инструмента с синтетическими алмазами там же, где и инструмента из натурального алмаза, то есть на чистовых и отделочных операциях при обработке деталей из цветных металлов и сплавов.

Физико-механические характеристики синтетических СТМ

Основа материала	Марка	$\sigma_{-в}$, ГПа	$\sigma_{и}$, МПа	HV · 10 ⁻³	$\theta_{к}$, °С
Синтетический алмаз	АСБ	0,4...0,6	780	49,0...88,2	600...770
	АСПК	0,4...0,8	500...1000	78,4...97,0	800...900
	АТП	0,3...0,4	800...850	49,0...51,0	680...730
Кубический нитрид бора	Эльбор-Р	2,2...3,2	700...980	76,5...91,0	1070...1200
	Гексанит-Р	2,0...4,0	1200...1500	71,8...91,0	1000...1100
	Киборит	2,6...3,2	550...650	76,5...86,0	1300

Поликристаллы СТМ на основе КНБ, незначительно уступая алмазу по твердости, отличаются высокой термостойкостью (до 1300 °С) и, что особенно важно, отсутствием химического средства с черными металлами. Наибольшую эффективность инструменты, оснащенные такими поликристаллами, показывают при обработке высокотвердых чугунов, сталей и сплавов.

Высокая термостойкость материалов на основе КНБ позволяет производить их напайку на инструмент. В остальном технологичность СТМ ничем не отличается от технологичности натурального алмаза.

Относительная стоимость инструмента, оснащенного поликристаллами синтетических сверхтвердых материалов, несколько ниже относительной стоимости твердосплавного инструмента.

Выводы

1. В современном машиностроении используются инструментальные материалы различной природы: стали, металлокерамические твердые сплавы, режущая керамика, монокристаллы натурального алмаза, кубический нитрид бора и другие синтетические сверхтвердые материалы.

2. При выборе инструментальных материалов для конкретной технологической операции необходимо учитывать их твердость, прочность, термостойкость и химическое средство с обрабатываемым материалом.

3. Широкая гамма инструментальных материалов позволяет осуществлять операции обработки резанием с высокой экономической эффективностью.

Вопросы для самоконтроля

1. К каким инструментальным материалам применяют характеристику «красностойкость»?
2. Какие инструменты в настоящее время изготавливают из углеродистых инструментальных сталей?
3. Чему равна массовая доля углерода в легированной инструментальной стали 9ХС?
4. Какова массовая доля вольфрама в быстрорежущей стали P10Ф5К5?
5. Как влияет на шлифуемость быстрорежущих сталей увеличение массовой доли ванадия?
6. Как влияет на твердость сплава ВК6 увеличение размера зерна карбида вольфрама?
7. Какова массовая доля карбида вольфрама в твердом сплаве Т5К10?
8. Заготовки из каких материалов нецелесообразно обрабатывать инструментом, оснащенным оксидной керамикой?
9. Что произойдет с алмазным режущим инструментом, если температура в зоне резания превысит 800 °С?
10. Какой материал, кроме искусственного алмаза, относят к сверхтвердым синтетическим материалам?

2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОБКАТНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

2.1. Основные правила обкатки

Обкатные инструменты благодаря своим преимуществам – высокой производительности, удобству автоматизации процесса обработки, сравнительно высокой точности изделий – находят широкое применение при изготовлении разнообразных деталей с профилями сложной конфигурации, в том числе зубчатых колес, шлицевых валов и т. д. При проектировании обкатных инструментов следует иметь в виду определенные условия, которые можно назвать **правилами обкатки**. Эти условия, вытекающие из теории сопряженных профилей, в применении к инструментам состоят в следующем:

- 1) инструмент и заготовка в процессе обработки должны составлять кинематическую пару, то есть их центроиды должны без проскальзывания обкатываться друг по другу;
- 2) обкатываемые профили в каждый момент времени в точке касания должны иметь общую нормаль;
- 3) нормаль к сопряженным профилям должна проходить через *полос зацепления* – точку касания центроид изделия и инструмента;
- 4) нормали к некоторой последовательности точек профиля изделия должны пересекать его центроиду в той же последовательности.

Примечание. Участок профиля изделия, где это правило не выполняется, будет очерчен не регулярной кривой (например эвольвентой), а какой-то переходной линией;

- 5) линия, проведенная через любую точку профиля изделия эквидистантно центроиду инструмента, должна иметь общую точку с линией профилирования. Под *линией профилирования* (по аналогии с линией зацепления зубчатых колес) понимается геометрическое место точек касания режущего профиля инструмента с профилем изделия.

Иллюстрацией к некоторым из этих правил служит рис. 2.

2.2. Классификация инструментов, работающих методом обкатки

Классификация обкатных инструментов может быть осуществлена, прежде всего, по форме центроиды. Центроиду в виде прямой имеют зубострогальные гребенки и червячные фрезы. Центроида в виде окружности свойственна долбякам, шеверам, фасонным обкаточным резцам.

В зависимости от формы центроид инструмента и изделия обработка может производиться по схемам, которые условно назовем «рейка – колесо» и «колесо – колесо». По схеме «рейка – колесо» обрабатывают зубчатые колеса зубострогальными гребенками и резцами, а также червячными фрезами. По этой же схеме обрабатывают червячными фрезами незвольвентные профили. Во всех упомянутых выше случаях инструмент имитирует рейку, а заготовка – колесо.

По схеме «колесо – рейка» работают обкаточные резцы для обточки фасонных профилей на телах вращения. Здесь уже заготовка имитирует рейку, а резец – колесо.

Схему «колесо – колесо» используют при изготовлении цилиндрических колес долбяками и шеверами, при обработке конических зубчатых колес.

Обкатные режущие инструменты можно распределить на две группы в зависимости от способа осуществления обкаточного движения. Для одной группы обкаточное движение полностью осуществляется механизмами металлорежущего станка. Так работают долбяки, зуборезные гребенки и некоторые другие инструменты. В другой группе обкатка является результатом комбинации движения, сообщаемого заготовке станком, с движением режущего профиля, заложенным в конструкцию инструмента. Так, при обработке червячной фрезой перемещение рейки в осевом направлении возникает потому, что зубья инструмента расположены на винтовой поверхности. Это перемещение комбинируется с вращением колеса, которое осуществляется станком.

Обкатные инструменты могут быть цельными, сварными и сборными. В первом случае инструмент изготавливается целиком из режущего материала (например быстрорежущей стали).

Во втором случае режущую часть инструмента из быстрорежущей стали приваривают к крепежной части, изготовленной из конструкционной стали. Наконеч, сборные инструменты, в том числе оснащенные твердыми сплавами, состоят из корпуса и отдельных зубьев-резцов, скоординированных и закрепленных в корпусе тем или иным способом.

Выводы

1. Обкатные инструменты, обладающие высокой производительностью и обеспечивающие высокую точность обработки изделий, имеют высокую стоимость, поэтому применяются только в условиях автоматизированного крупносерийного и массового производства.

2. При проектировании обкатных инструментов следует иметь в виду правила обкатки, вытекающие из теории сопряженных профилей.

3. Обкатные инструменты классифицируют по форме centroида. Если centroида инструмента – прямая линия, обработка изделия производится по схеме «рейка – колесо». Если centroида инструмента – окружность, обработка изделия производится по схеме «колесо – колесо».

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте основные правила обкатки.
2. В каком случае на некотором участке профиля изделия будет возникать переходная кривая?
3. Какие обкатные инструменты работают по схеме «рейка – колесо»?
4. Какие обкатные инструменты работают по схеме «колесо – колесо»?
5. По какой схеме обкатки работают зуборезные долбяки и шеверы?

3. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС, РАБОТАЮЩИЕ ПО СХЕМЕ «РЕЙКА – КОЛЕСО»

3.1. Зубострогальные гребенки

3.1.1. Геометрические параметры зубьев гребенок

Схема работы гребенки 1 при изготовлении прямозубого некорригированного колеса 2 показана на рис. 3.

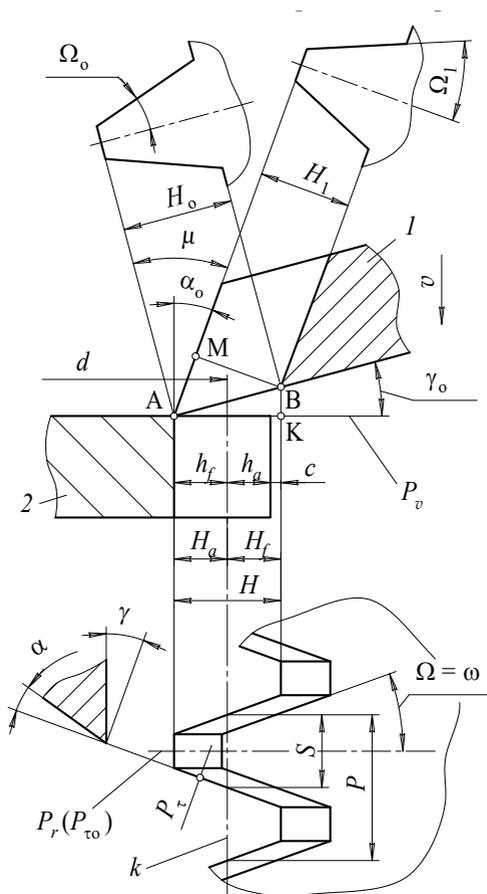


Рис. 3. Параметры зубострогальной гребенки

Поскольку вектор скорости v главного движения инструмента направлен параллельно оси колеса, то основная плоскость P_v проходит перпендикулярно этой оси. Вид сверху на рис. 3 – это фактически проекция гребенки на основную плоскость, из которой видно, что каждый отдельный зуб инструмента имеет три прямолинейные режущие кромки: одну поперечную и две боковые.

Пусть гребенка установлена на зубострогальном станке таким образом, что на ее поперечной кромке в главной секущей плоскости P_{τ_0} возникли передний угол γ_0 и задний угол α_0 . Плоскость P_{τ_0} поперечной кромки совпадает с радиальной секущей плоскостью P_r всего зуба в целом, то есть для боковых кромок зуба $\gamma_r = \gamma_0$ и $\alpha_r = \alpha_0$.

Передние и задние углы в главной секущей плоскости P_{τ} на боковых кромках рассчитаем, используя формулы единой геометрии режущего лезвия. При $\gamma_s = 0$ и угле в плане $\varphi = 90^\circ - \omega$

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_0 \sin \omega; \quad (3.1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_0 \sin \omega. \quad (3.2)$$

Стандартные углы установки гребенки на современных зубострогальных станках $\gamma_0 = 6^\circ 30'$ и $\alpha_0 = 5^\circ 30'$. При стандартном угле зацепления $\omega = 20^\circ$ по формулам (3.1) и (3.2) получаем, что на боковых режущих кромках гребенки $\gamma = 2^\circ 14'$ и $\alpha = 1^\circ 53'$.

Значение $\gamma \approx 2^\circ$ при обработке некоторых (особенно вязких) материалов оказывается недостаточным. В этом случае применяют зубострогальные гребенки с дополнительной заточкой. Два вида такой заточки показаны на рис. 4. Первый из них применяют для гребенок с модулем $m < 10$, а второй – с модулем $m = 10 \dots 24$ мм. По первому варианту (рис. 4, а) гребенку устанавливают под углом η к горизонту и затачивают всю переднюю поверхность небольшим абразивным кругом диаметром d_k . При этом, как следует из рассмотрения треугольника OMQ ,

$$\sin \gamma_{s_i} = \frac{s_i}{d_k}, \quad (3.3)$$

где s_i – текущая толщина зуба гребенки.

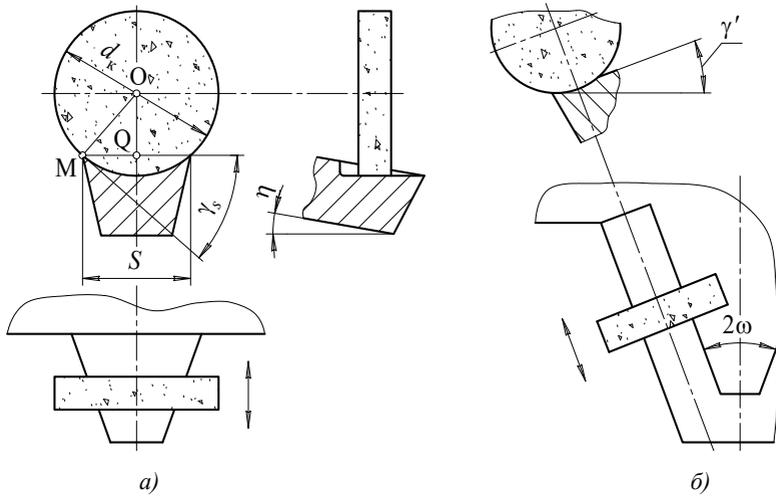


Рис. 4. Заточка гребенок [11]

Среднее значение угла γ_s^{cp} определим, подставив в формулу (3.3) толщину зуба гребенки по начальной линии S и положив за малостью угла $\sin \gamma_s^{\text{cp}} \approx \text{tg } \gamma_s^{\text{cp}}$:

$$\text{tg } \gamma_s^{\text{cp}} \approx \frac{S}{d_k}. \quad (3.4)$$

Имея в виду выражение (3.4), полученный заточкой передний угол на боковых кромках зуба рассчитываем по формуле

$$\text{tg } \gamma_{\text{зат}} = \text{tg } \gamma_s^{\text{cp}} \cos \omega + \text{tg } \eta \sin \omega. \quad (3.5)$$

Полное значение переднего угла, возникающего за счет предварительной заточки и последующей установки гребенки на металлорежущем станке, получаем, суммируя значения углов, рассчитанных по формулам (3.1) и (3.5):

$$\gamma' = \gamma + \gamma_{\text{зат}}. \quad (3.6)$$

Может быть решена и обратная задача. Задав значение γ' , по формуле (3.6) определяют $\gamma_{\text{зат}}$, а затем при известных d_k и S по формуле (3.5) – угол η установки гребенки при заточке.

По второму варианту (рис. 4, б) передний угол

$$\gamma_{\text{зат}} = \arcsin \frac{b}{d_k}$$

имеет постоянное значение по всей длине режущей кромки (b – ширина канавки). Следовательно, и в процессе резания $\gamma' = \text{const}$. В этом преимущество второго способа заточки перед первым. Другим преимуществом второго способа заточки является более высокая точность боковых кромок инструмента. Дело в том, что кромка образуется как результат пересечения плоскости (передней поверхности до заточки) с цилиндрической поверхностью круга. Во втором варианте заточки эта плоскость пересекает поверхность круга параллельно оси его вращения, что, как известно, дает прямую линию. В первом варианте заточки цилиндр (круг) пересекается плоскостью, наклоненной к его оси под углом η_1 , что придает кромкам криволинейную форму и вносит погрешности в геометрию боковой поверхности зубьев нарезаемого колеса.

К сожалению, малые размеры зубьев гребенок при $m < 10$ не позволяют осуществлять их заточку по второму варианту.

3.1.2. Профилирование гребенок

При профилировании зуборезных гребенок, как и любого фасонного инструмента, различают три профиля: исходный, промежуточный и шлифуемый.

Исходным называется профиль гребенки в проекции на основную плоскость P_v (см. рис. 3). Параметры гребенки в исходном профиле непосредственно связаны с параметрами зубьев нарезаемого колеса, а именно:

- угол профиля гребенки равен углу зацепления ($\Omega = \omega$);
- шаг зубьев гребенки по делительной прямой k равен окружному шагу колеса по делительной окружности d ($P = p = \pi m$);
- толщина S зуба гребенки по линии k равна толщине впадины между зубьями колеса по окружности d и составляет

$$S = \frac{\pi m}{2} + \Delta s; \quad (3.7)$$

- высота головки зуба гребенки равна высоте ножки зуба колеса:

$$H_a = h_f = 1,25m. \quad (3.8)$$

Теоретически высота ножки зуба гребенки на исходном профиле должна быть равна высоте головки зуба колеса. Однако для того

чтобы гребенка не обрабатывала наружную цилиндрическую поверхность (окружность выступов) колеса, которую получают течением, высоту ножки гребенки увеличивают на некоторую величину c , то есть делают $H_f = h_a + c$ (см. рис. 3).

Чаще всего назначают $c = 0,25m$, выполняя ножку и головку зуба гребенки равными по высоте ($H_f = H_a = 1,25m$). В этом случае полная высота исходного профиля гребенки

$$H = H_a + H_f = 2,5m. \quad (3.9)$$

Приведенные выше значения S , H_a , H_f и H относятся к так называемым *чистовым* гребенкам, которые предназначены для окончательной обработки зубчатого колеса. В производстве применяются также два других вида гребенок: шлифовочные и черновые. *Шлифовочные* гребенки предназначены для обработки профиля зубьев колеса с припуском на последующую шлифовку, а *черновые* — для предварительной прорезки впадин зубчатых колес. Естественно, что толщины зубьев чистовых, шлифовочных и черновых гребенок должны отвечать условию $S_{\text{черн}} < S_{\text{шлиф}} < S$. Обычно принимают

$$S_{\text{черн}} = S - 0,4\sqrt{m};$$

$$S_{\text{шлиф}} = S - 0,2\sqrt{m}.$$

Шлифовочные и черновые гребенки отличаются от чистовых и высотой зубьев (рис. 5), причем $H_{\text{черн}} > H_{\text{шлиф}} > H$.

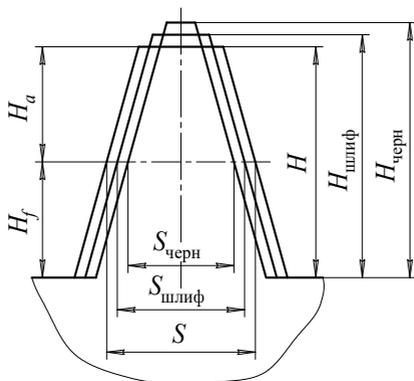


Рис. 5. Профили гребенок различных типов

Это позволяет повысить точность обработки за счет разгрузки поперечных кромок шлифовочных и чистовых гребенок.

Обычно принимают

$$H_{\text{черн}} = H + 0,2\sqrt{m};$$

$$H_{\text{шлиф}} = H + 0,1\sqrt{m}.$$

Высота *промежуточного профиля* (профиля в плоскости передней поверхности инструмента), как следует из треугольника ABK на рис. 3,

$$H_o = \frac{H}{\cos \gamma_o}. \quad (3.10)$$

Поскольку при $\gamma_o \neq 0$ $H_o > H$, а толщина зуба и другие размеры гребенки, измеренные вдоль делительной прямой k , одинаковы для всех трех перечисленных профилей, то угол профиля Ω_o в общем случае отличается от угла зацепления и может быть найден из соотношения

$$\text{tg } \Omega_o = \frac{H}{H_o} \text{tg } \omega = \text{tg } \omega \cos \gamma_o. \quad (3.11)$$

Высоту *шлифуемого профиля*, расположенного в плоскости, нормальной к задней поверхности инструмента, определим из треугольника ABM :

$$H_1 = H_o \sin(90^\circ - \mu) = H_o \cos \mu.$$

Поскольку $\mu = \gamma_o + \alpha_o$, с учетом (3.10) окончательно получаем

$$H_1 = H \frac{\cos(\gamma_o + \alpha_o)}{\cos \gamma_o}. \quad (3.12)$$

Угол шлифуемого профиля определяют из соотношения

$$\text{tg } \Omega_1 = \frac{H}{H_1} \text{tg } \omega = \frac{\text{tg } \omega \cos \gamma_o}{\cos(\gamma_o + \alpha_o)}. \quad (3.13)$$

Заточку гребенки осуществляют шлифованием по плоскости передней поверхности. При этом изменения размеров H_o и H_1 , а также углов Ω_o и Ω_1 не происходит. В этом, а также в простоте конструкции инструмента состоят главные достоинства зуборезных гребенок.

3.1.3. Расчет минимальной длины гребенки

Основным недостатком метода нарезания зубчатых колес гребенками является прерывистость процесса обкатки. Дело в том, что для обработки с одной установки колеса с делительной окружностью d гребенка должна иметь длину $L \geq \pi d = \pi m z$. Однако это условие выполнимо только при обработке колес небольшого модуля и с малым числом зубьев. В большинстве же случаев пришлось бы делать гребенку длиной не менее полуметра, что недопустимо с точки зрения прочности инструмента. Реальные гребенки делают значительно меньшей длины, а после обработки нескольких зубьев колеса процесс останавливают, инструмент выводят из контакта с заготовкой и возвращают в исходное положение. Заготовку при этом не поворачивают. При следующем ходе гребенка обрабатывает еще несколько зубьев колеса.

Определим минимальную длину гребенки L_{\min} , необходимую для полной обработки профиля одной впадины между зубьями колеса (рис. 6).

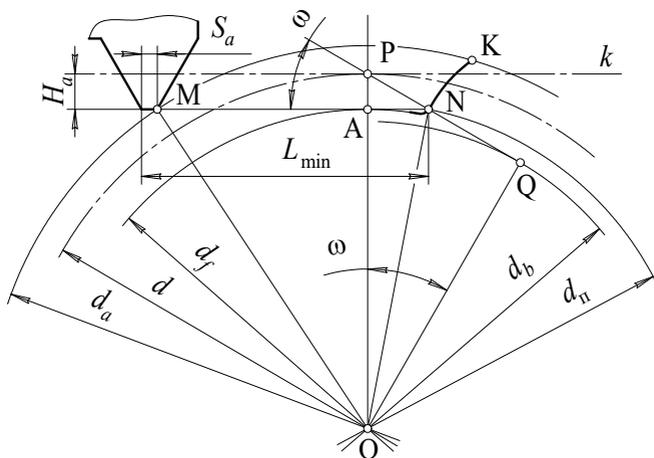


Рис. 6. Схема работы гребенки

Инструмент, двигаясь в процессе обкатки слева направо, начинает резание в точке M на наружном диаметре d_a заготовки. В соответствии с правилом 5 обкатки эта точка режущей кромки гребенки

закончит свою работу в точке N , находящейся на пересечении линии профилирования PQ с линией, параллельной начальной прямой k . Следовательно, минимальная длина гребенки, измеренная по линии выступов режущих зубьев, должна быть равна

$$L_{\min} = S_a + \overline{MN},$$

где S_a – толщина зуба инструмента на линии выступов,

$$S_a = S - 2H_a \operatorname{tg} \omega.$$

Из рис. 6 видно, что $\overline{MN} = \overline{MA} + \overline{AN}$.

Так как в треугольнике OMA

$$\overline{OM} = 0,5d_a = r_a \text{ и } \overline{OA} = 0,5d - H_a = r - H_a,$$

то

$$\overline{MA} = \sqrt{r_a^2 - (r - H_a)^2}.$$

Из треугольника ANP находим, что $\overline{AN} = H_a \operatorname{ctg} \omega$. Тогда

$$L_{\min} = S_a + H_a \operatorname{ctg} \omega + \sqrt{r_a^2 - (r - H_a)^2}. \quad (3.14)$$

Практически гребенки делают большей длины, чем получается расчетом по формуле (3.14). Это позволяет обеспечить обработку нескольких зубьев колеса до перерыва в процессе обкатки.

Пользуясь рис. 6, отметим, что рабочий участок профиля зубьев, нарезанных гребенкой, имеет длину KN . Он расположен между окружностью выступов колеса r_a и окружностью, проходящей через точку N . Радиус последней

$$r_n = \sqrt{\overline{OA}^2 + \overline{AN}^2} = \sqrt{(r - H_a)^2 + H_a^2 \operatorname{ctg}^2 \omega}, \quad (3.15)$$

назовем *переходным радиусом*, поскольку все точки зубьев колеса, расположенные на участке $r_n - r_f$, где r_f – радиус окружности впадин, будут принадлежать не эвольвенте, а переходной кривой.

3.2. Червячные фрезы для нарезания зубчатых колес

3.2.1. Основные элементы конструкции фрез

Червячная фреза представляет собой одно- или многозаходный червяк с углом подъема винтовой линии τ , на котором с целью создания системы режущих кромок выполнены два вида дополнительных элементов (рис. 7):

- 1) стружечные канавки, формирующие передние поверхности зубьев фрезы и составляющие с ее осью угол λ_k (число стружечных канавок определяет число зубьев фрезы Z);
- 2) затылки, формирующие задние поверхности зубьев фрезы.

Червяк, составляющий основу фрезы, он же *основной* червяк, теоретически должен быть *эвольвентным*, то есть линия пересечения боковых поверхностей витка плоскостью, перпендикулярной оси червяка, должна представлять собой эвольвенту. При этом, однако, линии пересечения витков с осевой плоскостью фрезы и плоскостью, нормальной к винтовой линии, тоже не являются прямыми. Существующие на сегодняшний день методы затылования обеспечивают правильность задних поверхностей зубьев, расположенных на винтовой поверхности, только при прямолинейном профиле режущих кромок, поэтому эвольвентный червяк технологически неприменим в качестве основного червяка фрез.

Прямолинейный профиль в плоскости, перпендикулярной винтовой линии, обеспечивает *конволютный* червяк, однако погрешности профиля изделия при этом столь значительны, что фрезы на основе таких червяков могут применяться только для обработки зубчатых колес 9-й и 10-й степеней точности.

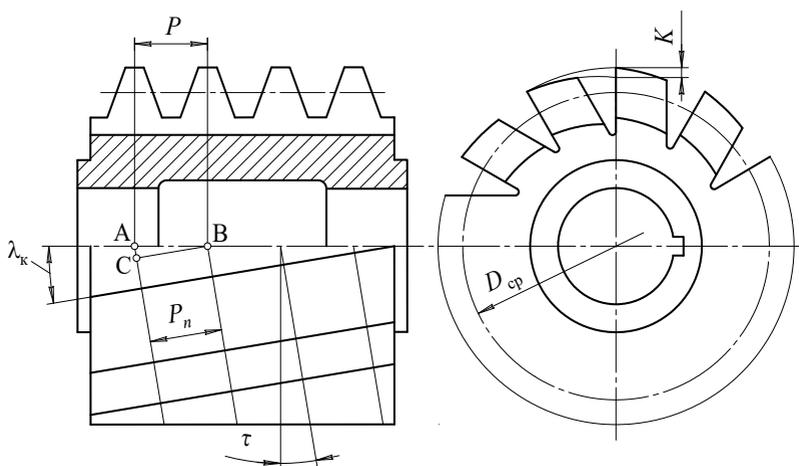


Рис. 7. Геометрические параметры червячной фрезы

Наибольшее применение получили фрезы на основе *архимедова* червяка, которые имеют прямолинейный профиль в осевом сечении. Этот профиль идентичен профилю зубострогальной рейки, то есть содержит q одинаковых режущих контуров, каждый из которых имеет три прямолинейных участка: одну поперечную и две боковые режущие кромки.

Чаще всего зубьям фрезы придают передний угол $\gamma_{\rho} = 0$, а задний угол α_{ρ} в радиальной секущей плоскости на поперечных режущих кромках назначают в пределах $9...15^{\circ}$. В этом случае, как показывает расчет по формуле (3.2), при стандартном угле профиля (угле зацепления) $\omega = 20^{\circ}$ на боковых кромках возникают углы $\alpha = 3...5^{\circ}$.

В остальном геометрия зуба червячной фрезы практически не отличается от геометрии зубьев фасонных затылованных фрез.

Особое место при конструировании червячных фрез занимает вопрос об угле подъема винтовой линии червяка. Для однозаходной фрезы можем записать

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{P}{\pi D_{\text{cp}}}, \quad (3.16)$$

где P – осевой шаг; D_{cp} – средний диаметр винтовой линии.

Шаг винтовой линии по нормали к ее виткам, как следует из треугольника ABC (см. рис. 7), $P_n = P \cos \lambda_k$.

Чтобы передние поверхности зубьев фрезы были перпендикулярны винтовой линии, а каждый из контуров q работал как резцовой резец второго типа и имел одинаковые условия резания на боковых кромках, обычно назначают $\lambda_k = \tau$. В таком случае

$$P_n = P \cos \tau. \quad (3.17)$$

Подставляя (3.17) в (3.16), получаем

$$D_{\text{cp}} = \frac{P_n}{\pi \sin \tau}. \quad (3.18)$$

В процессе резания фреза должна быть установлена так, чтобы витки ее винтовой линии были параллельны направлению зубьев обрабатываемого колеса. Например, при обработке прямозубого колеса ось фрезы должна быть повернута на угол $\mu = 90^{\circ} - \tau$ по отношению к оси колеса. При этом колесо нарезается с окружным ша-

гом зубьев p , равным нормальному шагу витков фрезы. Поскольку $p = \pi m$, то формула (3.18) принимает вид

$$D_{\text{cp}} = \frac{m}{\sin \tau}. \quad (3.19)$$

В общем случае при нарезании колес с углом β наклона зубьев на делительной окружности

$$D_{\text{cp}} = \frac{\cos \beta}{\sin \tau} m_t, \quad (3.20)$$

где m_t — торцовый модуль колеса.

Анализ зависимостей (3.19) и (3.20) показывает, что увеличение τ приводит к уменьшению среднего (а значит, и наружного) диаметра фрезы. Это выгодно с точки зрения экономии инструментального материала и сокращения времени врезания фрезы в заготовку. С другой стороны, уменьшение D_{cp} вызывает необходимость уменьшить количество зубьев инструмента, а следовательно, снижается производительность процесса резания. Практически применяемые значения τ — от 2 до 6°, причем меньшие значения углов относятся к чистовым фрезам.

Пример 1. Червячная фреза диаметром 125 мм предназначена для нарезания прямозубых колес с модулем 10 мм. Какой угол подъема винтовой линии имеет фреза?

Средний диаметр фрезы $D_{\text{cp}} = D - 2H_a = D - 2,5m = 100$ мм.

Из (3.19): $\sin \tau = 0,1 \Rightarrow \tau = 5,74^\circ$.

К конструктивным элементам червячных фрез, не связанным непосредственно с процессом резания, относятся специальные буртики, показанные на рис. 7. Эти буртики служат для контроля биения фрезы при установке ее на оправку зубофрезерного станка, поскольку проверка биения по режущей части инструмента затруднительна, а биение фрезы влияет на шероховатость обработанной поверхности. Чтобы буртики были расположены концентрично режущей части фрезы, в процессе изготовления инструмента их шлифуют каждый раз, когда обрабатывают профиль зубьев инструмента.

Минимальную длину фрезы L_{min} рассчитывают так же, как и минимальную длину зубострогальной гребенки — по формуле (3.14). Фактическую длину фрезы L делают кратной L_{min} , для того чтобы

иметь возможность передвигать инструмент по оправке по мере изнашивания его зубьев.

3.2.2. Исходное сечение зубьев фрезы

Как всякий затылованный инструмент, червячную фрезу затачивают по передней поверхности. При заточке наружный диаметр фрезы уменьшается, а режущий профиль смещается к оси инструмента.

Пусть новая фреза имела наружный диаметр $D_a^{\text{нов}}$, а после заточки ее передняя поверхность повернулась на угол ψ от первоначального положения (рис. 8). Поскольку затылок фрезы очерчен архимедовой спиралью, то уменьшение Δ радиуса фрезы пропорционально падению затылка K зуба:

$$\Delta = \psi K / \varepsilon, \quad (3.21)$$

где ε — угол между зубьями.

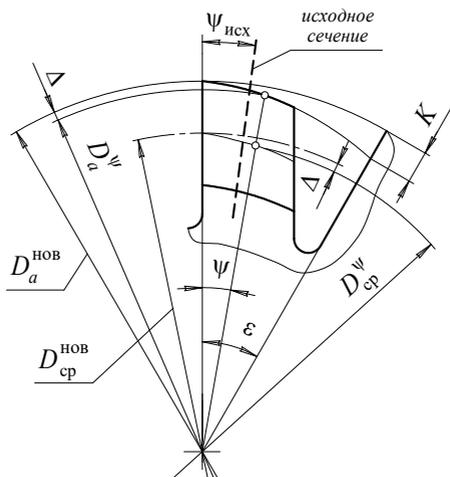


Рис. 8. Положение исходного сечения зуба червячной фрезы

Боковые поверхности зуба очерчены конхоидами архимедовой спирали, поэтому средний диаметр фрезы после заточки тоже уменьшится на величину 2Δ :

$$D_{\text{сп}}^{\psi} = D_{\text{сп}}^{\text{нов}} - 2\psi K / \varepsilon. \quad (3.22)$$

Возвратимся к выражению (3.16). Так как осевой шаг фрезы P после заточки не меняется, а средний диаметр уменьшается, то угол подъема винтовой линии увеличивается:

$$\operatorname{tg} \tau_{\psi} = \frac{P}{\pi D_{\text{ср}}^{\psi}} = \frac{P}{\pi(D_{\text{ср}}^{\text{нов}} - 2\psi K/\varepsilon)}. \quad (3.23)$$

Тогда, как следует из (3.17), уменьшается нормальный шаг P_n винтовой линии фрезы, а значит, и равный ему окружной шаг нарезаемого колеса

$$p_{\psi} = P_{n\psi} = P \cos \tau_{\psi}. \quad (3.24)$$

Из формулы (3.17) с учетом того, что у новой фрезы $P_n = p$, получаем $P = p / \cos \tau$. Тогда

$$p_{\psi} = p \frac{\cos \tau_{\psi}}{\cos \tau}. \quad (3.25)$$

У реальных зубчатых колес задается не только номинальное значение шага p , но и его отклонения (как правило, симметричные), то есть предельные значения p_{min} и p_{max} (рис. 9).

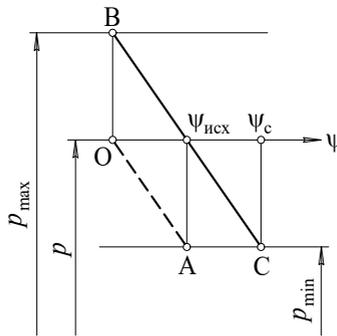


Рис. 9. Поле допуска на шаг колеса и его использование

Предположим, что мы изготовили новую фрезу с $P_n = p$, то есть с нормальным шагом, равным номиналу окружного шага зубчатого колеса. По мере заточек (с увеличением ψ) шаг нарезаемых колес будет уменьшаться (линия OA на рис. 9). В тот момент, когда угол ψ достигнет некоторой величины $\psi_{\text{исх}}$, будет выбран весь допуск окружного шага нарезаемого колеса в «минус» и фрезу придется снять с эксплуатации, чтобы не производить бракованные изделия.

При этом весь допуск окружного шага в «плюс» окажется неиспользованным.

Срок службы инструмента можно увеличить, если новой фрезе придать нормальный шаг $P_n^{\text{нов}} = p_{\text{max}}$. Теперь при заточках изменение шага будет описываться линией BC , а фреза придет в негодность только при $\psi = \psi_c = 2\psi_{\text{исх}}$. Угол ψ_c отражает *предел стачивания* фрезы.

Таким образом, новая фреза будет нарезать зубчатые колеса с окружным шагом, имеющим погрешность со знаком «плюс» в пределах поля допуска. После заточки под углом $\psi_{\text{исх}}$ будут резаться колеса с номинальным значением шага, а после заточки под углом $\psi \in (\psi_{\text{исх}}; \psi_c)$ – с шагом в интервале от номинального до минимально допустимого.

Чтобы реализовать такую схему работы в конструкции фрезы, исходный (теоретический) профиль зуба червячной фрезы должен находиться в сечении, расположенном под углом $\psi_{\text{исх}}$ к передней поверхности нового инструмента (см. рис. 8).

На практике обычно назначают $\psi_{\text{исх}} = \varepsilon / 4$, а предел стачивания $\psi_c = \varepsilon / 2$.

Приступая к проектированию червячной фрезы, конструктор имеет весьма скудную информацию: модуль m прямозубого колеса или торцовый модуль m_t и угол β наклона зуба косозубого колеса, которое будет изготавливаться фрезой. Как с помощью этих параметров определить, например, такую важную характеристику будущей фрезы, как средний диаметр $D_{\text{ср}}^{\text{нов}}$?

1. Выбирают предварительное значение угла подъема винтовой линии червяка τ' в диапазоне $2...6^\circ$.

2. По формулам (3.19) или (3.20) рассчитывают предварительный средний диаметр фрезы $D'_{\text{ср}}$.

3. Назначают величину затылования (падение затылка) K фрезы в зависимости от модуля зацепления по табл. 10.

Таблица 10

Рекомендуемая величина затылования червячных фрез, мм [14]

m	1,5...2,75	3...3,5	3,75...4,5	5	5,5...6	6,5...7	8	9	10
K	3,0	4,0	4,5	5,0	6,0	6,5	7,0	8,0	8,5

4. Относят полученное в п. 2 значение D'_{cp} к исходному сечению фрезы и с помощью формулы (3.22), учитывая, что $\psi_{\text{исх}} = 0,25\epsilon$, рассчитывают предварительный средний диаметр новой фрезы

$$(D_{\text{cp}}^{\text{нов}})' = D'_{\text{cp}} + 0,5K.$$

5. Определяют предварительный наружный диаметр новой фрезы

$$(D_a^{\text{нов}})' = (D_{\text{cp}}^{\text{нов}})' + 2H_a = (D_{\text{cp}}^{\text{нов}})' + 2,5m,$$

где H_a – высота головки зуба фрезы, $H_a = 1,25m$.

6. Выбирают ближайший стандартный наружный диаметр фрезы из нормального ряда 50; 63; 80; 100; 125; 160 и т. д.

7. Определяют окончательный средний диаметр новой фрезы, средний диаметр в исходном сечении и угол подъема винтовой линии червяка:

$$D_{\text{cp}}^{\text{нов}} = D_a^{\text{нов}} - 2,5m;$$

$$D_{\text{cp}}^{\text{исх}} = D_{\text{cp}}^{\text{нов}} - 0,5K;$$

$$\tau_{\text{нов}} = \arcsin \frac{m}{D_{\text{cp}}^{\text{нов}}}.$$

Пример 2. Какой наружный диаметр, средний диаметр в исходном сечении и угол наклона стружечных канавок должна иметь червячная фреза, предназначенная для нарезания прямозубых колес с модулем 5 мм?

Положим $\tau' = 5^\circ$. Из (3.19): $D'_{\text{cp}} \approx 57,4$ мм.

По табл. 10: $K = 5$ мм. Из (3.22): $(D_{\text{cp}}^{\text{нов}})' = 59,9$ мм.

Тогда $(D_a^{\text{нов}})' = 72,4$ мм.

Примем по ГОСТ $D_a^{\text{нов}} = 80$ мм. Тогда $D_{\text{cp}}^{\text{нов}} = 67,5$ мм.

Из (3.22): $D_{\text{cp}}^{\text{исх}} = 65$ мм. Из (3.19): $\sin \tau_{\text{нов}} = 0,074 \Rightarrow \tau_{\text{нов}} = 4^\circ 15'$;
 $\lambda = \tau_{\text{нов}} = 4^\circ 15'$.

Выводы

1. По схеме «рейка – колесо» работают зуборезные гребенки и червячные фрезы для нарезания зубчатых колес.

2. В производстве используют три вида зуборезных гребенок: черновые, шлифовочные и чистовые, которые отличаются высотой и толщиной зубьев.

3. Червячные фрезы для нарезания зубчатых колес, проектируемые на основе архимедова червяка, имеют прямолинейный профиль в осевом сечении, идентичный профилю зубострогальной рейки.

4. Чтобы использовать всё поле допуска на изготовление профиля зубчатого колеса, теоретический профиль зуба фрезы располагают в сечении, находящемся под некоторым углом к передней поверхности нового инструмента.

Вопросы для самоконтроля

1. Как затачивают зубострогальные гребенки малого модуля?
2. В чем состоят достоинства заточки гребенок по периметру каждого отдельного зуба?
3. Для чего увеличивают высоту ножки зуба гребенки по сравнению с теоретической?
4. Как соотносятся между собой толщины зубьев чистовых, шлифовочных и черновых гребенок?
5. Верно ли утверждение, что угол шлифуемого профиля зубьев гребенки всегда больше угла зацепления?
6. Что является основным недостатком метода нарезания зубчатых колес гребенками?
7. Какие виды червяков могут составлять основу червячной фрезы? Каковы достоинства и недостатки каждого вида?
8. Как влияет угол подъема винтовой линии червяка на средний диаметр фрезы?
9. Как должна быть установлена червячная фреза в процессе обработки заготовки?
10. Почему исходный профиль зуба червячной фрезы должен находиться в сечении, расположенном под некоторым углом к передней поверхности нового инструмента?

4. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС, РАБОТАЮЩИЕ ПО СХЕМЕ «КОЛЕСО – КОЛЕСО»

4.1. Зуборезные долбяки

4.1.1. Геометрические параметры долбяков

Зуборезный долбяк представляет собой зубчатое колесо, в конструкцию которого добавлены элементы, обеспечивающие процесс резания:

- 1) передняя поверхность в виде кругового конуса с углом γ_0 при основании, ось которого совпадает с осью долбяка (см. рис. 11);
- 2) задняя поверхность, для создания которой зубья долбяка выполняют таким образом, что каждое сечение, перпендикулярное оси инструмента, имеет свою особую величину смещения контура $x = \xi m$.

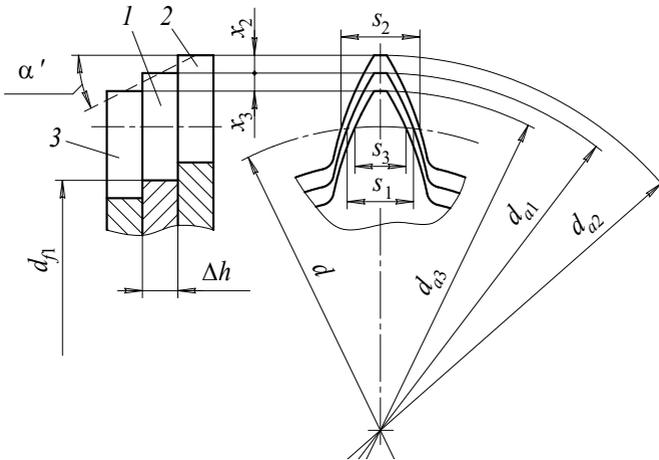


Рис. 10. Образование задних поверхностей долбяка

Для пояснения этой формулировки рассмотрим рис. 10. На нем изображены три зубчатых колеса с общей осью вращения, но различными смещениями контуров. Колесо 1 некорректированное, колесо 2 – с положительной, а колесо 3 – с отрицательной высотной

коррекцией. В соответствии с теорией зубчатых зацеплений все три колеса имеют одну и ту же делительную окружность d и одинаковый окружной шаг, но различные диаметры окружностей выступов и впадин и толщины зуба по делительной окружности:

$$\left. \begin{aligned} d_{a1} &= m(z+2) + 2x_i; \\ d_{f1} &= m(z-2,5) + 2x_i; \\ s_i &= 0,5\pi m + 2x_i \operatorname{tg} \omega. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Как видно из условий (4.1) и рис. 10, в нашем случае (при $x_1 = 0$; $x_2 > 0$ и $x_3 < 0$) выполняются соотношения

$$\begin{aligned} d_{a3} &< d_{a1} < d_{a2}; \\ d_{f3} &< d_{f1} < d_{f2}; \\ s_3 &< s_1 < s_2. \end{aligned}$$

Таким образом, двигаясь вдоль оси долбяка от его рабочего торца к нерабочему, в плоскости, перпендикулярной оси инструмента, мы вначале будем получать сечения с уменьшающейся положительной коррекцией, потом обнаружим сечение с нулевой коррекцией, а затем — сечения с возрастающей отрицательной коррекцией профиля. Сечение, содержащее профиль с нулевой высотной коррекцией, называется *исходным сечением*.

Переходя от конечного числа слоев (колес) с конечной толщиной Δh к бесконечно большому числу слоев толщиной $\Delta h \rightarrow 0$, получаем гладкую поверхность, которая и является задней поверхностью зуба долбяка. При этом усредненный угол α' (см. рис. 10) становится равным заднему углу α_0 на поперечной режущей кромке долбяка.

Вектор скорости резания v при возвратно-поступательном главном движении долбяка параллелен его оси (рис. 11), поэтому основная плоскость P_v проходит перпендикулярно этой оси. Нижняя проекция на рис. 11 — это фактически проекция режущих кромок отдельного зуба долбяка на основную плоскость. Каждый зуб имеет три режущие кромки: поперечную, представляющую собой дугу окружности радиусом R_a , и две боковые эвольвентного профиля.

Главная секущая плоскость P_{τ_0} в любой точке поперечной кромки проходит через ось долбяка, то есть совпадает с радиальной секущей плоскостью P_r всего инструмента. В этой плоскости задаются

и контролируются передний γ_0 и задний α_0 углы долбяка, о которых было сказано выше. Для определения углов на боковых кромках зуба долбяка воспользуемся закономерностями единой геометрии режущего лезвия.

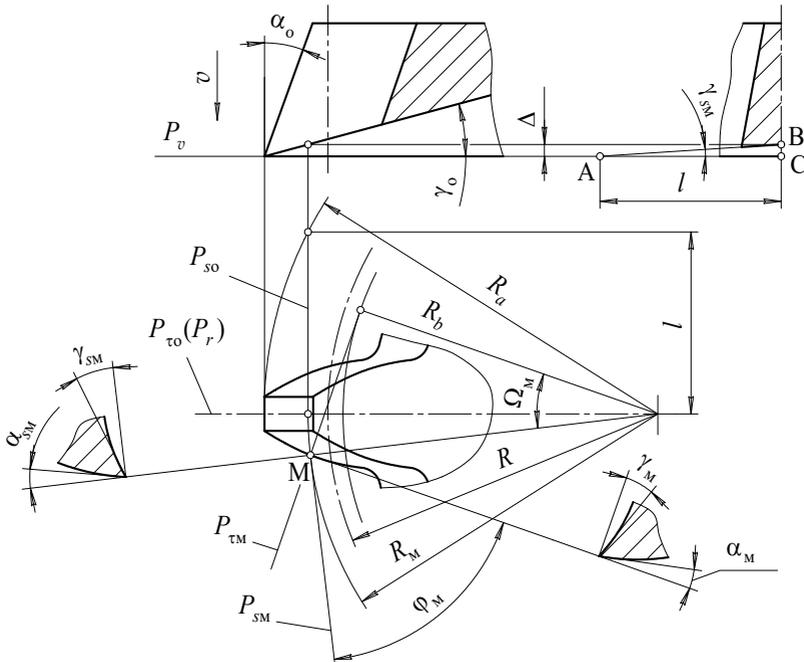


Рис. 11. Геометрические параметры зуба долбяка

Представим элементарный участок проекции боковой режущей кромки на основную плоскость, расположенный в окрестности точки M , в виде элементарного прямолинейного режущего лезвия. Для этого лезвия радиальная секущая плоскость проходит через ось долбяка, а осевая секущая плоскость P_{sm} — перпендикулярно P_v по касательной к окружности радиусом R_m (рис. 11). Нормалью к эвольвенте является, как известно, касательная к основной окружности R_b , проведенная через точку M . С этой касательной совпадает след главной секущей плоскости P_{tm} для элементарного участка кромки (сама плоскость P_{tm} , как и P_{sm} , перпендикулярна плоскости рисунка). Роль угла в плане, находящегося в основной плоскости между

касательной к кромке и следом плоскости P_{sm} , здесь выполняет угол $\varphi_M = 90^\circ - \Omega_M$, где Ω_M — угол давления эвольвенты в точке M боковой кромки долбяка.

Применяя формулы единой геометрии, получаем

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_M &= \operatorname{tg} \alpha_o \sin \Omega_M; \\ \operatorname{tg} \alpha_{sm} &= \operatorname{tg} \alpha_o \operatorname{tg} \Omega_M. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Для того чтобы определить передний угол γ_M в главной секущей плоскости, необходимо помимо угла $\gamma_M = \gamma_o$ знать еще и значение угла γ_{sm} в плоскости P_{sm} . Рассчитаем его из следующих соображений. Сечения конической передней поверхности долбяка плоскостью P_{sm} или любой другой плоскостью, касательной к окружности R_M (например P_{so}), представляют собой одинаковые гиперболы, поскольку все эти плоскости параллельны оси конуса и одинаково удалены от нее. Заменяем в первом приближении эту кривую двумя хордами, симметричными относительно плоскости $P_{то}$. Одна из хорд (AB) показана на рис. 11.

Из треугольника ABC

$$\operatorname{tg} \gamma_{sm} \approx \frac{\Delta}{l} = \frac{\Delta}{\sqrt{R_a^2 - R_M^2}}. \quad (4.3)$$

Из сечения долбяка плоскостью $P_{то}$ видно, что

$$\Delta = (R_a - R_M) \operatorname{tg} \gamma_o. \quad (4.4)$$

Подставляя (4.4) в (4.3), после элементарных алгебраических преобразований получаем

$$\operatorname{tg} \gamma_{sm} \approx \operatorname{tg} \gamma_o \sqrt{\frac{R_a - R_M}{R_a + R_M}}. \quad (4.5)$$

Тогда

$$\operatorname{tg} \gamma_M \approx \operatorname{tg} \gamma_o \left(\cos \Omega_M \sqrt{\frac{R_a - R_M}{R_a + R_M}} + \sin \Omega_M \right). \quad (4.6)$$

Для точек боковых кромок, лежащих на делительном цилиндре ($R_M = R = 0,5mZ$; $\Omega_M = \Omega$), с учетом того, что $R_a = R + 1,25m$, получаем

$$\operatorname{tg} \gamma_s \approx \operatorname{tg} \gamma_o \sqrt{\frac{1,25}{1,25 + Z}}; \quad (4.7)$$

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \operatorname{tg} \gamma_0 \left(\cos \Omega \sqrt{\frac{1,25}{1,25 + Z}} + \sin \Omega \right), \quad (4.8)$$

где Z — число зубьев долбяка; Ω — угол давления эвольвенты на делительном цилиндре, то есть профильный угол долбяка.

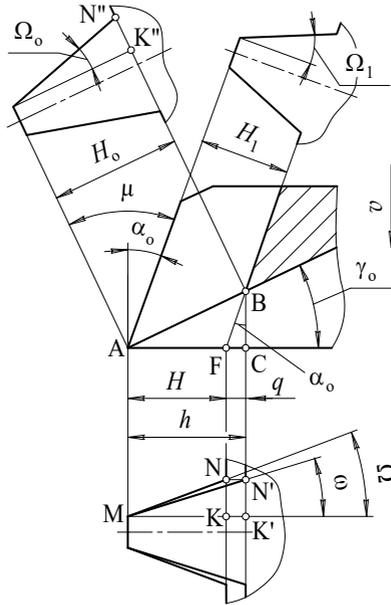


Рис. 12. Профили зуборезного долбяка

Некоторые авторы (например [11]) предлагают в формуле (4.8) пренебречь первым слагаемым в скобках, принимая $\gamma_s = 0$. Формула упрощается, однако погрешности в определении угла γ , как следует из приведенного ниже примера 3, могут быть достаточно ощутимыми.

Чтобы найти профильный угол Ω , обратимся к рис. 12. Поскольку дальнейшие рассуждения справедливы для долбяков с любым числом зубьев, для упрощения рисунка и анализа рассмотрим долбяк, число зубьев которого $Z \rightarrow \infty$. Такой долбяк имеет делительный диаметр $D \rightarrow \infty$ и превращается в зуборезную гребенку с прямолинейным профилем.

Пусть в любом сечении, перпендикулярном оси долбяка, его зуб имеет высоту профиля H . Такая же высота зуба нарезаемого колеса

получится при работе инструмента с передним углом $\gamma_0 = 0$. Если $\gamma_0 \neq 0$, то высота зуба колеса h , как видно из рис. 12, будет больше H :

$$h = H + q.$$

Из треугольников BCF и ABC находим, что $q = \overline{BC} \cdot \text{tg } \alpha_0$, а $\overline{BC} = h \text{tg } \gamma_0$. Тогда

$$h = H + h \text{tg } \gamma_0 \text{tg } \alpha_0,$$

откуда следует, что, для того чтобы получить на нарезаемом колесе высоту зуба h , долбяк должен иметь в диаметральном сечении высоту зуба

$$H = h(1 - \text{tg } \gamma_0 \text{tg } \alpha_0). \quad (4.9)$$

Из треугольников MNK и $MN'K'$

$$\overline{NK} = H \text{tg } \Omega \text{ и } \overline{N'K'} = h \text{tg } \omega.$$

Так как толщина зуба с изменением угла γ_0 не меняется, приравняв правые части двух последних выражений, получаем

$$\text{tg } \Omega = \frac{h}{H} \text{tg } \omega,$$

или, учитывая (4.9),

$$\text{tg } \Omega = \frac{\text{tg } \omega}{1 - \text{tg } \gamma_0 \text{tg } \alpha_0}. \quad (4.10)$$

У реальных долбяков с конечным числом зубьев формула (4.10) позволяет рассчитать профильный угол на делительном диаметре. В любой другой точке M боковой режущей кромки, как следует из свойств эвольвенты, угол давления эвольвенты определяется соотношением

$$\cos \Omega_M = \frac{D}{D_M} \cos \Omega, \quad (4.11)$$

в котором D и D_M — соответственно диаметры делительной окружности долбяка и окружности, проходящей через точку M ($D_M \in [D_b; D_a]$).

Пример 3. По ГОСТ 9323–79 для нарезания колес с углом профиля $\omega = 20^\circ$ долбяки должны иметь на окружности выступов в радиальном сечении углы $\gamma_0 = 5^\circ$ и $\alpha_0 = 6^\circ$.

Какие передний и задний углы в главной секущей плоскости на делительном цилиндре будет иметь стандартный долбяк с двадцатью зубьями?

Какая погрешность будет внесена в расчет угла γ , если пренебречь первым слагаемым в формуле (4.8)?

Из (4.10): $\operatorname{tg} \Omega = 0,367 \Rightarrow \Omega = 20,17^\circ$.

Из (4.2): $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_0 \sin \Omega = 0,036 \Rightarrow \alpha \approx 2^\circ$.

Из (4.8): $\operatorname{tg} \gamma \approx 0,05 \Rightarrow \gamma \approx 2^\circ 51'$.

Без первого слагаемого в формуле (4.8): $\operatorname{tg} \gamma' \approx 0,03 \Rightarrow \gamma' \approx 1^\circ 43'$.
Погрешность расчета 40 %.

4.1.2. Профилирование долбяков

Исходный профиль долбяка – это профиль в основной плоскости P_v (см. рис. 11), перпендикулярной оси долбяка. Для долбяка с бесконечно большим числом зубьев, показанного на рис. 12, исходный профиль совпадает с профилем исходной зубчатой рейки нарезаемого колеса.

Как следует из треугольника ABC (рис. 12), высота *промежуточного профиля* долбяка (по образующей конической передней поверхности)

$$H_o = \frac{h}{\cos \gamma_o},$$

или, учитывая (4.9),

$$H_o = \frac{H}{(1 - \operatorname{tg} \gamma_o \operatorname{tg} \alpha_o) \cos \gamma_o}. \quad (4.12)$$

Из равенства отрезков $N'K'$ и $N''K''$ следует, что

$$\operatorname{tg} \Omega_o = \operatorname{tg} \omega \cos \gamma_o. \quad (4.13)$$

Поскольку *шлифуемый профиль* долбяка, расположенный в плоскости, нормальной к его задней поверхности, повернут относительно промежуточного на угол $\mu = \gamma_o + \alpha_o$, то

$$H_1 = H_o \cos(\gamma_o + \alpha_o); \quad (4.14)$$

$$\operatorname{tg} \Omega_1 = \frac{\operatorname{tg} \omega \cos \gamma_o}{\cos(\gamma_o + \alpha_o)}. \quad (4.15)$$

Все указанные размеры закладываются и контролируются в исходном сечении долбяка (см. 4.1.1), которое имеет нулевую высотную коррекцию. Расстояние от исходного сечения до рабочего торца нового долбяка называют *смещением исходного сечения*

$$A = X \operatorname{ctg} \alpha_o, \quad (4.16)$$

где X – величина коррекции контура, лежащего в плоскости рабочего торца нового долбяка.

В произвольном сечении, находящемся на расстоянии y_i от рабочего торца нового долбяка, величина коррекции контура будет составлять

$$X_i = (A - y_i) \operatorname{tg} \alpha_o. \quad (4.17)$$

Если в исходном сечении диаметры окружностей выступов и впадин долбяка $D_{a \text{ исх}}$ и $D_{f \text{ исх}}$, а толщина зуба по делительной окружности $S_{\text{исх}}$, то, подставляя (4.17) в (4.1), получаем, что в произвольном сечении

$$\left. \begin{aligned} D_{ai} &= D_{a \text{ исх}} + 2(A - y_i) \operatorname{tg} \alpha_o; \\ D_{fi} &= D_{f \text{ исх}} + 2(A - y_i) \operatorname{tg} \alpha_o; \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

$$S_i = S_{\text{исх}} + 2(A - y_i) \operatorname{tg} \alpha_o \operatorname{tg} \Omega. \quad (4.19)$$

Значения диаметров окружностей выступов и впадин, а также толщину зуба нового долбяка по делительной окружности можно получить из (4.18) и (4.19) подстановкой $y_i = 0$:

$$\left. \begin{aligned} D_a^{\text{нов}} &= D_{a \text{ исх}} + 2A \operatorname{tg} \alpha_o; \\ D_f^{\text{нов}} &= D_{f \text{ исх}} + 2A \operatorname{tg} \alpha_o; \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

$$S_{\text{нов}} = S_{\text{исх}} + 2A \operatorname{tg} \alpha_o \operatorname{tg} \Omega. \quad (4.21)$$

Обычно в ходе заточек (а затачивают долбяки путем шлифования конуса, образующего переднюю поверхность зубьев) долбяки стачивают за исходное сечение до некоторого *предела стачивания* $B \approx 1,5A$. В этом случае

$$\left. \begin{aligned} D_a^{\text{ст}} &= D_{a \text{ исх}} + 2(A - B) \operatorname{tg} \alpha_o; \\ D_f^{\text{ст}} &= D_{f \text{ исх}} + 2(A - B) \operatorname{tg} \alpha_o; \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

$$S_{\text{ст}} = S_{\text{исх}} + 2(A - B) \operatorname{tg} \alpha_o \operatorname{tg} \Omega. \quad (4.23)$$

После каждой заточки долбяка заготовку будут обрабатывать контуры, имеющие всё меньшую высотную коррекцию, но поскольку все они образованы одной и той же исходной рейкой, то и все нарезанные долбяком колеса будут иметь одинаковый эвольвентный профиль. Однако при этом следует иметь в виду, что после каждой заточки необходимо корректировать расстояние между осями заготовки и инструмента, иначе нарезанное колесо будет иметь неправильное соотношение между высотами головки и ножки.

На любой стадии эксплуатации долбяка его обкатка с заготовкой должна происходить с межцентровым расстоянием

$$L_i = \frac{m(z \pm Z)}{2} \cdot \frac{\cos \omega}{\cos \Omega_{wi}}, \quad (4.24)$$

где Ω_{wi} – угол зацепления долбяка с заготовкой в процессе обработки.

Для определения угла Ω_{wi} воспользуемся зависимостью из теории эвольвентных зубчатых зацеплений

$$\text{inv } \omega_w = \text{inv } \omega + 2 \frac{\xi_1 + \xi_2}{z_1 \pm z_2} \text{tg } \omega,$$

в которую вместо ξ_1 и z_1 подставим параметры нарезаемого колеса x/m и z , а вместо ξ_2 и z_2 – параметры долбяка X_i/m и Z соответственно. С учетом (4.17) получаем

$$\text{inv } \Omega_{wi} = \text{inv } \omega + 2 \frac{x + (A - y_i) \text{tg } \alpha_o}{m(z \pm Z)} \text{tg } \omega. \quad (4.25)$$

Знак «плюс» в (4.24) и (4.25) берется при обработке колеса внешнего, а знак «минус» – внутреннего зацепления. Например, при нарезании некорректированного колеса ($x = 0$) внутреннего зацепления новым долбяком ($y_i = 0$)

$$\text{inv } \Omega_w^{\text{нов}} = \text{inv } \omega + \frac{2A}{m(z - Z)} \text{tg } \alpha_o \text{tg } \omega. \quad (4.26)$$

Определив угол Ω_{wi} и подставив его в (4.24), получаем зависимость для назначения межцентрового расстояния по мере стачивания долбяка.

В выражения (4.16)–(4.26) входит заранее не известное смещение исходного сечения A . Определение его оптимальной – с целого ряда точек зрения – величины является важной задачей проектирования зуборезных долбяков.

4.1.3. Оптимизация величины смещения исходного сечения долбяка

Смещение исходного сечения является важным параметром конструкции долбяков, поскольку влияет на эксплуатационные характеристики как инструмента, так и изготовленного с его помощью зубчатого колеса. С точки зрения увеличения количества заточек (а значит, и полного периода стойкости) долбяка и снижения себе-

стоимости зубообработки величина A должна быть выбрана по возможности максимальной в рамках определенных технических ограничений. Эти ограничения возникают потому, что с увеличением A :

- 1) уменьшается толщина зуба долбяка на окружности выступов, зуб заостряется, повышается скорость его изнашивания и вероятность скола вершины в процессе резания;
- 2) увеличивается диаметр окружности выступов долбяка, из-за чего может возникнуть подрезание ножки зуба изготавливаемого колеса, а также уменьшение диаметра впадин колеса ниже допустимого предела;
- 3) увеличивается диаметр окружности впадин долбяка, из-за чего может возникнуть срезание головки зуба изготавливаемого колеса.

Для оптимизации смещения исходного сечения все эти ограничения должны быть описаны математически.

Толщина зуба долбяка по окружности выступов S_{ai} , измеренная в произвольном сечении, перпендикулярном оси инструмента, связана с толщиной зуба по делительной окружности S_i соотношением

$$S_{ai} = D_{ai} \left(\frac{S_i}{D} + \text{inv } \Omega - \text{inv } \Omega_{ai} \right), \quad (4.27) \quad (4.27)$$

известным из теории эвольвентного зацепления.

В формуле (4.27) Ω_{ai} – угол давления эвольвенты на окружности выступов, рассчитываемый с помощью формулы (4.11). Например, в плоскости рабочего торца нового долбяка

$$S_a^{\text{HOB}} = D_a^{\text{HOB}} \left(\frac{S_a^{\text{HOB}}}{D} + \text{inv } \Omega - \text{inv } \Omega_a^{\text{HOB}} \right); \quad (4.28)$$

$$\cos \Omega_a^{\text{HOB}} = \frac{D}{D_a^{\text{HOB}}} \cos \Omega. \quad (4.29)$$

Техническое ограничение по толщине зуба долбяка имеет вид

$$S_a^{\text{HOB}} \geq S_{a \text{ min}}. \quad (4.30)$$

Ориентировочное значение минимально допустимой толщины зуба на окружности выступов можно найти по эмпирической формуле [14]

$$S_{a \text{ min}} = 0,51 \sqrt{m}. \quad (4.31)$$

Поскольку $D_a^{\text{НОВ}}$, $S_{\text{НОВ}}$ и $\Omega_a^{\text{НОВ}}$ зависят от смещения исходного сечения, то и $S_a^{\text{НОВ}} = f(A)$. Таким образом, выражение (4.30) фактически накладывает на величину смещения ограничение вида $A \leq c_1$.

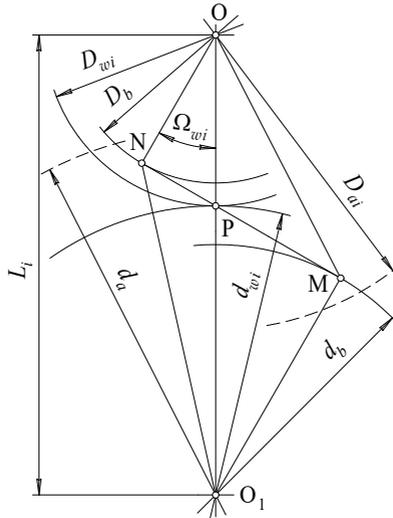


Рис. 13. Подрезание ножки зуба

Подрезание ножки зуба изготавливаемого колеса происходит в том случае, если окружность выступов долбяка проходит за пределами точки касания линии зацепления с основной окружностью колеса. В обозначениях рис. 13 условие неподрезания ножки имеет вид

$$0,5D_{ai} \leq \overline{OM}. \quad (4.32)$$

Из треугольника OMN

$$\overline{OM} = \sqrt{(0,5D_b)^2 + MN^2},$$

а из треугольников ONP и O_1MP

$$\overline{MN} = L_i \sin \Omega_{wi}. \quad (4.33)$$

С учетом последнего выражения условие (4.32) принимает вид

$$\sqrt{(2L_i \sin \Omega_{wi})^2 + D_b^2} - D_{ai} \geq 0, \quad (4.34)$$

где $D_b = mZ \cos \Omega$ – диаметр основной окружности долбяка.

Неравенство (4.34), в котором все величины, имеющие индекс i , зависят от смещения исходного сечения, накладывает на это смещение ограничение вида $A \leq c_2$.

Диаметр впадин зубчатого колеса, нарезаемого долбяком,

$$d_{fi} = 2L_i \mp D_{ai} \quad (4.35)$$

и в соответствии с государственным стандартом [4] должен отвечать условию

$$d_f - d_{fi} \leq 0,2m, \quad (4.36)$$

где d_f — расчетный диаметр впадин колеса,

$$d_f = m(z \mp 2,5) + 2x. \quad (4.37)$$

В формулах (4.35) и (4.37) верхний знак относится к колесам внешнего, а нижний — внутреннего зацепления.

Неравенство (4.36) аналогично (4.34) приводится к виду $A \leq c_3$.

Срезание головки зуба изделия может произойти в том случае, если окружность выступов d_a колеса проходит за пределами точки касания линии зацепления с основной окружностью долбяка. В обозначениях рис. 13 условие несрезания головки имеет вид

$$0,5d_a \leq \overline{O_1N}. \quad (4.38)$$

Из треугольника O_1MN

$$\overline{O_1N} = \sqrt{(0,5d_b)^2 + \overline{MN}^2},$$

где d_b — диаметр основной окружности колеса, $d_b = mz \cos \omega$.

Тогда с учетом (4.33) условие (4.38) принимает вид

$$\sqrt{(2L_i \sin \Omega_{wi})^2 + d_b^2} - d_a \geq 0 \quad (4.39)$$

и может быть сведено к неравенству $A \leq c_4$.

Теоретически для отыскания оптимального смещения исходного сечения следует решить оптимизационную задачу с целевой функцией $A \rightarrow \max$ и рассмотренными выше техническими ограничениями. Практически же эту задачу решают следующим образом.

1. Определяют значение A , сравнивая толщину зуба на окружности выступов нового долбяка с минимально допустимой. Для этого, задаваясь двумя произвольно выбранными значениями A_1 и A_2 , определяют соответствующие им диаметры выступов $D_{a1}^{\text{нов}}$

и $D_{a2}^{\text{нов}}$, углы давления эвольвенты $\Omega_{a1}^{\text{нов}}$ и $\Omega_{a2}^{\text{нов}}$ с помощью выражения (4.29), а затем толщины зуба по окружности выступов $S_{a1}^{\text{нов}}$ и $S_{a2}^{\text{нов}}$ по формуле (4.28).

Проводя линейную интерполяцию (рис. 14), получают значение A , соответствующее величине $S_{a \min}$, из соотношения

$$\frac{S_{a \min} - S_{a1}^{\text{нов}}}{A - A_1} = \frac{S_{a2}^{\text{нов}} - S_{a1}^{\text{нов}}}{A_2 - A_1}. \quad (4.40)$$

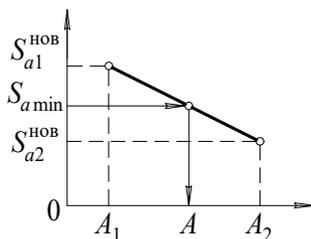


Рис. 14. Определение величины A

2. Проверяют, выполняются ли условия (4.34), (4.36) и (4.39) при найденном значении A . Здесь необходимо учитывать, что нарушение первого и третьего условий наиболее вероятно при работе окончательно сточенным долбяком, когда оси инструмента и заготовки максимально сдвинуты, а второго — при работе новым долбяком. Это означает, что в проверочные зависимости (4.34) и (4.39) следует подставлять значение D_a^{CT} из выражения (4.22), а также L_{CT} и Ω_w^{CT} , найденные по формулам (4.24) и (4.25) при $y_i = B$. В зависимость (4.36) должно быть подставлено значение $D_a^{\text{нов}}$ из выражения (4.20), а также $L_{\text{нов}}$ и $\Omega_w^{\text{нов}}$, найденные по тем же формулам (4.24) и (4.25) при $y_i = 0$.

Если хотя бы одно из условий — (4.34), (4.36) или (4.39) — не выполняется, следует увеличить число зубьев инструмента на один-два и, определив новые значения A и всех связанных с ним параметров, вновь провести проверку.

4.2. Шеверы

Типичным инструментом, работающим по схеме обкатки «колесо – колесо», является дисковый шевер. Шевер (от англ. *shaver* – бритва) представляет собою цилиндрическое зубчатое колесо с винтовыми зубьями, на боковой поверхности которых выполнены канавки, необходимые для образования режущих кромок. Шевер приводят в зацепление с заготовкой – зубчатым колесом, на котором зубья прорезаны предварительно (с припуском под шевингование). На рис. 15 показана схема зацепления шевера 1 с прямозубым колесом 2. Их оси скрещиваются под углом τ , равным углу наклона зубьев шевера по отношению к его оси β_1 . В случае обработки косозубого колеса

$$\tau = \beta_1 \pm \beta_2, \quad (4.41)$$

где β_1 и β_2 – соответственно углы наклона зубьев шевера и колеса к их осям. При одноименном направлении зубьев инструмента и колеса в формуле (4.41) берут знак плюс, а при разноименном – минус.

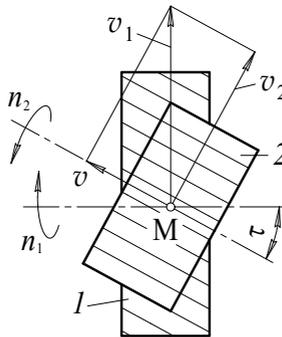


Рис. 15. Зацепление шевера с прямозубым колесом

Вращаясь с частотой n_1 , шевер приводит во вращение заготовку, которая, как следует из кинематики зубчатого зацепления, вращается вокруг своей оси с частотой $n_2 = \frac{Z}{z} n_1$ (Z и z – числа зубьев инструмента и колеса соответственно). Отдельная точка M на поверхности контакта зубьев шевера и заготовки имеет линейную скорость v_1 во вращении вокруг оси шевера и скорость v_2 во вращении вокруг оси заготовки. Из-за разности этих скоростей возникает скорость v

скольжения зуба шевера относительно зуба заготовки. В случае, показанном на рис. 15, скорость скольжения $v = v_1 \sin \beta_1$. Это выражение является частным случаем более общего выражения

$$v = v_1 \left(\sin \beta_1 \pm \frac{Z}{z} \sin \beta_2 \right), \quad (4.42)$$

справедливого для условий, когда косозубый шевер обрабатывает косозубое колесо. Знак в формуле (4.42) выбирается так же, как в (4.41).

Скорость скольжения v при шевинговании является скоростью резания, так как срезание тонких стружек с поверхности зубьев заготовки осуществляют кромки, расположенные на боковых поверхностях зубьев шевера и перпендикулярные вектору v . Для создания этих кромок на зубьях инструмента, как указывалось выше, делают канавки с шагом p (см. рис. 16).

Шевер – чистовой инструмент, который должен обеспечить заданную точность и качество обработанной поверхности. Высокое качество поверхности можно получить либо при очень низких скоростях резания, либо при достаточно высоких, превышающих скорость наростообразования. Исключая область низких скоростей как экономически нецелесообразную, приходим к выводу, что шеверы должны работать со скоростями $v > 40$ м/мин, а значит, как следует из оценки по формуле (4.42), с окружными скоростями $v_1 \approx 2 \dots 3$ м/с. Столь высокие скорости можно получить двумя путями: применить большие частоты вращения шевера или большие диаметры инструмента. Каждый из этих путей имеет свои достоинства и недостатки. При высоких значениях n_1 повышаются требования к шпиндельным узлам станков, возрастают погрешности профиля изделий, связанные с возможным дисбалансом инструмента. Увеличение диаметра шевера, с одной стороны, увеличивает расход инструментального материала, но с другой – повышает плавность зацепления за счет большего числа зубьев Z .

Как следует из (4.42), увеличить скорость v_1 можно также за счет увеличения угла наклона зубьев шевера β_1 . Однако увеличение угла β_1 ведет к уменьшению размеров зоны касания сопряженных поверхностей зубьев инструмента и заготовки, что снижает точность обработки.

Имея в виду приведенные выше, а также некоторые другие соображения, шеверы делают сравнительно большого диаметра (у инструментов с модулем $m = 2 \dots 8$ мм делают диаметр делительной окружности $D \approx 240$ мм) с углом $\beta_1 = 5 \dots 15^\circ$ (возможно также применение шеверов с углом $\beta_1 = 0$ при обработке косозубых колес). Необходимо уменьшить влияние погрешностей формы зубьев шевера на точность изделия, в частности, исключить возможность контакта одних и тех же зубьев инструмента и заготовки в процессе вращения обрабатываемого колеса и шевера. Поэтому количество зубьев шевера должно выражаться простым числом (29; 47; 83 и т. п.).

При известном числе зубьев Z и заданном угле β_1 диаметр делительной окружности инструмента можно определить по формуле

$$D = m_t Z = \frac{m_n Z}{\cos \beta_1},$$

в которой m_t — торцовый, а m_n — нормальный модули обрабатываемого колеса.

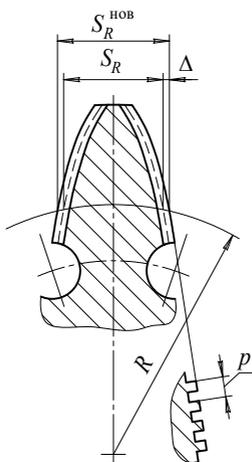


Рис. 16. Зуб шевера

Рассмотрим далее вопрос о форме и размерах зубьев шевера (рис. 16). Шаг режущих канавок обычно задают в пределах $p = 1,5 \dots 2$ мм, причем ширина зубчиков равна ширине впадин, а глубина $(0,3 \dots 0,5)p$. Глубина канавок влияет на количество заточек инструмента. Заточка шевера состоит в шлифовании боковых

поверхностей зубьев. На шлифование за весь срок службы шевера предусматривают припуск $\Delta = 0,2 \dots 0,5$ мм на сторону в зависимости от модуля инструмента.

В связи с необходимостью обеспечить припуск на заточку инструмента толщина зубьев нового шевера $S_R^{\text{нов}}$, как видно из рис. 16, должна быть больше теоретической толщины зубьев по делительной окружности S_R на 2Δ .

Что касается величины S_R , то ее определяют, как и у любого зубообрабатывающего инструмента, по формуле (3.7), подставляя в последнюю торцовый модуль шевера. Поскольку зуб нового инструмента толще, чем S_R , при наладке операции следует предусмотреть раздвижку осей шевера и заготовки на величину $c = \Delta \operatorname{ctg} \omega$, где ω — угол зацепления в торцовом сечении колеса.

Режущие канавки на зубьях шевера изготавливают с помощью долбежной гребенки. Чтобы обеспечить выход инструменту второго порядка на этой операции, у корня зубьев шевера делают отверстия, показанные на рис. 16.

Выводы

1. Зуборезный долбяк представляет собой зубчатое колесо, в конструкцию которого добавлены элементы, обеспечивающие процесс резания.

2. Для создания задней поверхности долбяка его зубья выполняют таким образом, что каждое сечение, перпендикулярное оси инструмента, имеет свою величину высотной коррекции.

3. Чтобы использовать всё поле допуска на изготовление профиля зубчатого колеса, теоретический профиль зуборезного долбяка располагают в сечении, смещенном относительно передней поверхности нового инструмента.

4. Величину смещения исходного сечения долбяка оптимизируют, исходя из минимальной толщины зуба долбяка на окружности выступов, а также из условий подрезания ножки и головки зуба изготавливаемого колеса.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой вид имеет передняя поверхность зуборезного долбяка?
2. Как называется сечение долбяка плоскостью, перпендикулярной его оси, в котором отсутствует высотная коррекция профиля?
3. Как проходит основная плоскость при обработке колес долбяками?
4. Зависит ли передний угол долбяка в главной секущей плоскости на боковых режущих кромках от числа зубьев инструмента?
5. В каком случае профильный угол на делительном диаметре долбяка был бы равен углу зацепления?
6. Что называют пределом стачивания зуборезного долбяка?
7. Как изменяется толщина зуба долбяка на окружности выступов с увеличением смещения исходного сечения?
8. При работе каким долбяком – новым или окончательно сточенным – наиболее вероятно подрезание ножки зуба изготавливаемого колеса?
9. Что является скоростью резания при шевинговании?
10. Почему число зубьев шевера по возможности должно быть простым числом?

5. ЧЕРВЯЧНЫЕ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБКАТКИ НЕЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ

В условиях массового производства для изготовления методом обкатки изделий с неэвольвентным профилем используют два вида инструмента: червячные фрезы и обкатные резцы.

С помощью червячных фрез обрабатывают профили в виде повторяющейся комбинации выступов и впадин (звездочки, прямо-боковые шлицевые валы и т. п.), а с помощью обкатных резцов — различные фасонные профили на телах вращения.

5.1. Исходные данные для проектирования фрез

Стандартом предусмотрены три способа центрирования шлицевого соединения:

- по наружному диаметру;
- по внутреннему диаметру;
- по боковым поверхностям шлицев.

При центрировании по наружному диаметру D (рис. 17, *a*) гарантированный зазор Δ существует между внутренними диаметрами шлицевого вала и втулки. В этом случае боковые стороны шлицев вала могут быть прямолинейными не до дна впадины диаметром d_1 , а только до окружности диаметром $d > d_1$, значение которого лимитировано стандартом. Ниже этой окружности может начинаться переходная кривая.

При центрировании по внутреннему диаметру d (рис. 17, *б*) зазор Δ существует между наружными диаметрами вала и втулки. В этом случае боковые поверхности шлицев должны быть прямолинейными непосредственно до посадочного диаметра d . Чтобы обеспечить это условие, у основания шлицев выполняют канавки, выдерживая размеры a и d_1 .

При центрировании по боковым поверхностям шлицев, то есть по размеру b (рис. 17, *в*), зазоры Δ_1 и Δ_2 существуют как между внутренними, так и между наружными поверхностями вала и втулки. На профиль шлицев вала в этом случае накладываются такие же ограничения, как и при центрировании по наружному диаметру.

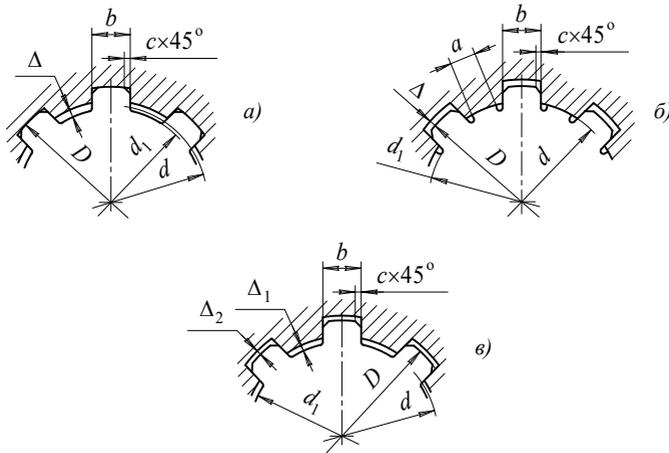


Рис. 17. Центрирование шлицевого соединения

Если у зуборезных червячных фрез рациональное использование поля допуска на окружной шаг нарезаемого колеса реализуется с помощью размещения теоретического профиля в исходном сечении (см. подраздел 3.2.2), то при проектировании шлицевых фрез, как правило, используют другой подход. Запас на изменение размеров при заточках такой фрезы закладывают в ее теоретический профиль, определяя его параметры на основе так называемых *расчетных размеров* шлицевого вала:

$$\left. \begin{aligned} d_{\text{расч}} &= d_{\text{min}} + 0,25Td; \\ b_{\text{расч}} &= b_{\text{min}} + 0,25Tb; \\ D_{\text{расч}} &= D_{\text{max}} - 2c_{\text{min}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

В формулах (5.1) Td и Tb — допуски на соответствующие размеры вала, а индексами «max» и «min» обозначены предельные размеры.

Логика получения первых двух формул системы (5.1) понять несложно: поскольку при заточках наружный диаметр и ширина профиля фрезы уменьшаются, новая фреза должна быть спроектирована таким образом, чтобы изготавливать внутренний диаметр шлицевого вала и ширину шлица на нижнем пределе полей допусков. В идеале следовало бы назначить $d_{\text{расч}} = d_{\text{min}}$ и $b_{\text{расч}} = b_{\text{min}}$, одна-

ко из-за возможных радиального и осевого биений фрезы величины $d_{\text{расч}}$ и $b_{\text{расч}}$ приходится несколько увеличивать.

Поскольку фреза не обрабатывает наружный диаметр вала (его получают точением), а обкатываемая боковая поверхность шлица начинается у основания фаски c , то наибольший обрабатываемый червячной фрезой диаметр шлицевого вала $D_{\text{расч}}$ определяется третьей формулой системы (5.1). Кстати сказать, фаски $c \times 45^\circ$ тоже обрабатываются червячной фрезой. Для этого вводят дополнительные участки за пределами теоретического профиля фрезы.

При проектировании фрезы для вала с базированием по внутреннему диаметру, который фрезеруют с припуском под последующее шлифование,

$$\left. \begin{aligned} d_{\text{расч}} &= d + \delta d; \\ b_{\text{расч}} &= b + \delta b, \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

где δd и δb — припуски на соответствующие размеры.

В последующем тексте раздела под размерами D , d и b следует понимать размеры $D_{\text{расч}}$, $d_{\text{расч}}$ и $b_{\text{расч}}$.

5.2. Построение линии профилирования

Поскольку червячная фреза — это обкатной инструмент, работающий по схеме «рейка — колесо», то в процессе обработки прямолинейная центроида инструмента k обкатывается без скольжения по центроиде колеса — окружности радиусом $r_{\text{ц}}$ (рис. 18). Линия профилирования в общем случае представляет собой плоскую кривую, форма которой зависит от конфигурации изготавливаемых выступов. С помощью уравнения линии профилирования определяют ряд параметров профиля инструмента.

Получим это уравнение для случая обкатки прямобочных шлицев.

Пусть выступ шлицевого вала в процессе обкатки пришел в положение, показанное на рис. 18, то есть боковая поверхность выступа оказалась повернутой на угол μ относительно линии, соединяющей центр O заготовки с полюсом зацепления P . Чтобы определить, какая точка боковой поверхности шлица будет обрабатываться в таком положении заготовки, используем правила

Из треугольника PMC , в котором $\angle PMC = \mu$, $x_M = \overline{PM} \cdot \cos \mu$, а из треугольника PMB $\overline{PM} = \overline{PB} \cdot \sin \mu$.

Поскольку $\overline{PB} = r_{\text{ц}} - \overline{OB}$, а из треугольника OAB $\overline{OB} = 0,5b / \sin \mu$, то

$$x_M = \left(r_{\text{ц}} - \frac{b}{2 \sin \mu} \right) \sin \mu \cos \mu$$

или

$$x_M = (r_{\text{ц}} \sin \mu - 0,5b) \cos \mu. \quad (5.3)$$

Из треугольника PMC видно, что $y_M = x_M \operatorname{tg} \mu$, то есть

$$y_M = (r_{\text{ц}} \sin \mu - 0,5b) \sin \mu. \quad (5.4)$$

Система, состоящая из выражений (5.3) и (5.4), описывает уравнение линии профилирования в параметрической форме, где параметром является текущий угол μ .

Определим координаты (x_0, y_0) экстремальной точки N линии профилирования. В точке экстремума, если уравнение задано параметрически,

$$\frac{dy}{d\mu} / \frac{dx}{d\mu} = 0.$$

Дифференцируя выражения (5.3) и (5.4), получаем

$$\frac{dx}{d\mu} = r_{\text{ц}} \cos 2\mu + 0,5b \sin \mu; \quad \frac{dy}{d\mu} = 2r_{\text{ц}} \sin \mu \cos \mu - 0,5b \cos \mu,$$

то есть

$$\frac{2r_{\text{ц}} \sin \mu_0 \cos \mu_0 - 0,5b \cos \mu_0}{r_{\text{ц}} \cos 2\mu_0 + 0,5b \sin \mu_0} = 0, \quad (5.5)$$

где μ_0 — угол, соответствующий точке экстремума.

Приравняв к нулю числитель выражения (5.5), приходим к уравнению

$$\cos \mu_0 (4r_{\text{ц}} \sin \mu_0 - b) = 0.$$

Поскольку, как видно из рис. 5.2, $\mu_0 \neq 90^\circ$, то и $\cos \mu_0 \neq 0$, а значит,

$$\sin \mu_0 = \frac{b}{4r_{\text{ц}}}. \quad (5.6)$$

Подставляя (5.6) в (5.3) и (5.4), получаем координаты экстремальной точки линии профилирования

$$\left. \begin{aligned} x_o &= -\frac{b}{4} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{4r_{ц}}\right)^2}; \\ y_o &= -\frac{b^2}{16r_{ц}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

Отрицательные значения x_o и y_o дополнительно подтверждают, что точка экстремума находится левее и выше полюса зацепления.

5.3. Определение радиуса центроиды валика

В оба выражения системы (5.7) входит величина $r_{ц}$. Следует заметить, что в отличие от обработки эвольвентных профилей, при которой можно в некотором диапазоне изменять расстояние между осями инструмента и заготовки (а следовательно, увеличивать или уменьшать диаметр центроиды зубчатого колеса), центроида шлицевого вала должна иметь постоянный диаметр, иначе на изделии будут изготовлены выступы неправильной формы.

От диаметра центроиды зависят не только координаты экстремальной точки линии профилирования, но и, как будет показано в подразделе 5.4, параметры профиля зуба шлицевой фрезы, поэтому определение величины $r_{ц}$ является одной из наиболее ответственных задач при проектировании таких фрез.

Определим диапазон, в котором должен находиться радиус центроиды прямобочного шлицевого вала при его обкатке червячной фрезой.

Согласно правилу 5 обкатки линия, проведенная через любую точку профиля изделия эквидистантно центроиде инструмента, должна иметь общую точку с линией профилирования. В нашем случае, когда линия профилирования имеет экстремум, это означает, что все точки профиля шлицевого вала, радиус которых окажется больше радиуса-вектора ON (см. рис. 18), не будут обкатаны инструментом. Поскольку при любом способе центрирования шлицевого соединения профиль шлица необходимо выполнить прямолинейным вплоть до наружного диаметра, должно соблюдаться условие

$$0,5D \leq \overline{ON}. \quad (5.8)$$

Из треугольника ONF имеем

$$\overline{ON} = \sqrt{x_o^2 + (r_{ц} + |y_o|)^2},$$

что с учетом (5.7) дает

$$\overline{ON}^2 = r_{ц}^2 + \frac{3}{16}b^2.$$

Тогда из условия (5.8)

$$r_{ц} \geq \frac{1}{4}\sqrt{4D^2 - 3b^2}. \quad (5.9)$$

С другой стороны, диаметр центроиды не может быть больше наружного диаметра вала, то есть должно выполняться условие $r_{ц} \leq 0,5D$. Таким образом, при проектировании червячной фрезы для обработки шлицевого вала радиус центроиды следует выбирать в диапазоне

$$\frac{1}{4}\sqrt{4D^2 - 3b^2} \leq r_{ц} \leq \frac{D}{2}. \quad (5.10)$$

Напомним, что в формулу (5.10) в качестве D и b необходимо подставлять расчетные значения наружного диаметра шлицевого вала и ширины шлица соответственно.

5.4. Построение профиля зуба фрезы

Получив уравнение линии профилирования и выбрав радиус центроиды шлицевого вала, можно приступить к построению профиля зуба червячной фрезы.

Поставим вал в такое положение, при котором прямая, описывающая боковой профиль шлица, проходит через полюс зацепления P (рис. 19). Поскольку в этом положении точка P принадлежит одновременно профилям изделия и инструмента, она является одной из точек профиля зуба фрезы.

Повернем вал на некоторый угол τ и, опустив перпендикуляр из полюса на боковую поверхность шлица, найдем точку M , которая будет обрабатываться в этом положении вала. Чтобы определить, какая точка N профиля фрезы будет при этом контактировать с заготовкой, обратимся к правилам обкатки. Во-первых, в соответствии с правилом 5 эта точка должна находиться на линии, эквидистант-

ной центроиде инструмента, то есть на прямой, параллельной прямой k . Во-вторых, в соответствии с правилом 1 центроида инструмента должна обкатываться по центроиде вала без скольжения, то есть длина отрезка NM , пройденного точкой профиля фрезы, должна быть равна длине дуги PA , пройденной точкой профиля вала, лежащей на окружности радиусом $r_{ц}$: $\overline{NM} = \cup PA = r_{ц} \tau$.

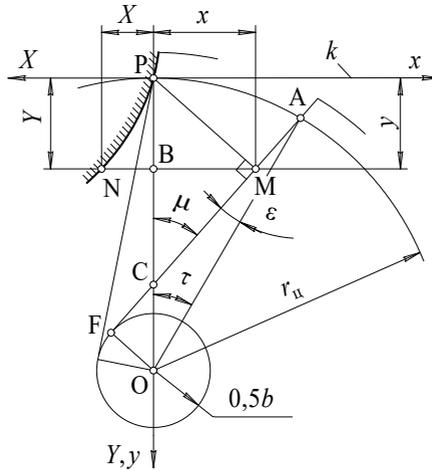


Рис. 19. Схема получения профиля фрезы

Угол ACP является внешним углом треугольника AOC , поэтому

$$\mu = \tau + \varepsilon.$$

Из треугольника AOF

$$\sin \varepsilon = \frac{b}{2r_{ц}}.$$

Тогда

$$\tau = \mu - \arcsin \frac{b}{2r_{ц}}; \quad (5.11)$$

$$\overline{NM} = \frac{\pi r_{ц}}{180^\circ} \left(\mu - \arcsin \frac{b}{2r_{ц}} \right). \quad (5.12)$$

Для аналитического описания профиля инструмента выберем систему координат XPY (рис. 19). Пусть в этой системе точка N имеет координаты (X, Y) . Тогда $\overline{NM} = X + x$, где x — абсцисса точки M , принадлежащей линии профилирования, в системе координат xPy ,

Для определения наибольшего значения угла μ используем изложенные в подразделе 5.1 требования к длине прямолинейного участка профиля. Переходная кривая начнется в той точке Q профиля (рис. 20), которую будет обрабатывать вершина зуба фрезы. При обработке шлицевого вала, центрируемого по наружному диаметру или боковым поверхностям шлицев, эта точка будет лежать на прямой, параллельной центруиде инструмента k и касательной к окружности диаметром $d_1 = 2r_1$.

Пусть положение шлица в момент обкатки точки Q характеризуется углом μ_{Π} . Тогда в соответствии с (5.4)

$$y_{\Pi} = r_{\Pi} \sin^2 \mu_{\Pi} - 0,5b \sin \mu_{\Pi}. \quad (5.15)$$

С другой стороны,

$$y_{\Pi} = \overline{AP} = r_{\Pi} - r_1. \quad (5.16)$$

Подставляя (5.16) в (5.15), получаем квадратное уравнение относительно $\sin \mu_{\Pi}$:

$$2r_{\Pi} \sin^2 \mu_{\Pi} - b \sin \mu_{\Pi} - 2(r_{\Pi} - r_1) = 0,$$

решение которого имеет вид

$$\sin \mu_{\Pi} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + 16r_{\Pi}(r_{\Pi} - r_1)}}{4r_{\Pi}}. \quad (5.17)$$

Поскольку угол μ_{Π} не может быть отрицательным, в числителе выражения (5.17) следует взять знак «плюс».

Таким образом, при построении профиля зуба фрезы следует придавать параметру μ значения

$$\arcsin\left(\frac{b}{4r_{\Pi}}\right) \leq \mu \leq \arcsin\left(\frac{b + \sqrt{b^2 + 16r_{\Pi}(r_{\Pi} - r_1)}}{4r_{\Pi}}\right). \quad (5.18)$$

Определив по формуле (5.3) координату x_{Π} переходной точки, из треугольника OAQ получаем

$$d_{\Pi} = 2\sqrt{r_1^2 + x_{\Pi}^2} = \sqrt{d_1^2 + (d_{\Pi} \sin \mu_{\Pi} - b)^2 \cos^2 \mu_{\Pi}}. \quad (5.19)$$

При изготовлении вала с центрированием по наружному диаметру или боковым поверхностям шлицев зависимость (5.19) используют, чтобы проверить, выполняется ли условие $d_{\Pi} \leq d_{\min}$, то есть изготавливается ли прямолинейный участок профиля шлица необходимой длины.

Из рис. 20 видно, что высота головки зуба фрезы для изготовления вала с центрированием по наружному диаметру или боковым поверхностям

$$H_a = r_{\text{ц}} - 0,5d_1, \quad (5.20)$$

а высота ножки зуба

$$H_f = 0,5D - r_{\text{ц}} + q, \quad (5.21)$$

где q – зазор, обеспечивающий необработку наружного диаметра вала.

5.5.2. Фрезы для валов с центрированием по внутреннему диаметру

При проектировании фрезы для изготовления шлицевого вала с центрированием по внутреннему диаметру прямолинейный участок шлица должен доходить до окружности диаметром d , а у основания шлица должны быть изготовлены канавки, показанные на рис. 17, б.

Угол $\mu_{\text{ц}}$ при работе такой фрезы определим, поставив вал в положение, когда точка S в основании нормали PS находится на окружности диаметром d (рис. 21).

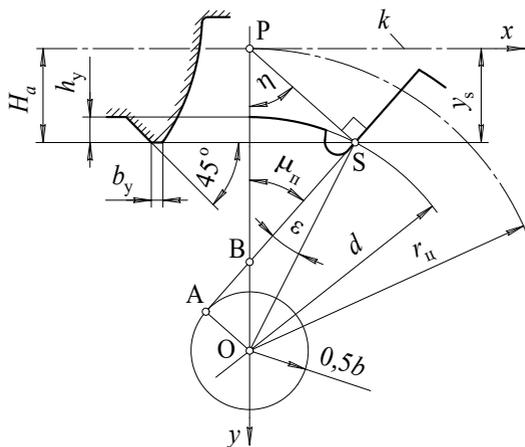


Рис. 21. Параметры фрезы с «усиками»

Применяя теорему синусов к треугольнику OPS , имеем

$$\frac{d}{2 \sin \eta} = \frac{r_{\text{ц}}}{\sin(90^\circ + \varepsilon)},$$

откуда $\sin \eta = \frac{d}{2r_{\text{ц}}} \cos \varepsilon$.

Из треугольника AOS $\sin \varepsilon = b/d$, то есть $\cos \varepsilon = \sqrt{d^2 - b^2}/d$. Тогда

$$\eta = \arcsin \frac{\sqrt{d^2 - b^2}}{2r_{\text{ц}}}. \quad (5.22)$$

Из треугольника BPS видно, что

$$\mu_{\text{ц}} = 90^\circ - \eta = 90^\circ - \arcsin(0,5\sqrt{d^2 - b^2}/r_{\text{ц}}). \quad (5.23)$$

Подставляя (5.23) в (5.4), получаем, что высота головки зуба фрезы, предназначенной для обработки шлицевого вала с центрированием по внутреннему диаметру,

$$H_a = y_s = (r_{\text{ц}} \sin \mu_{\text{ц}} - 0,5b) \sin \mu_{\text{ц}}. \quad (5.24)$$

Высота ножки зуба такой фрезы равна высоте ножки зуба фрезы для обработки вала, центрируемого по наружному диаметру, то есть рассчитывается по формуле (5.21).

Для изготовления канавок у основания шлицев вала с центрированием по внутреннему диаметру зубья фрезы снабжают так называемыми усиками (см. рис. 21). Ширина усиков b_y зависит от ширины канавки (а точнее, от размера a на рис. 17, б), а высота усиков, как видно из рис. 21,

$$h_y = H_a - (r_{\text{ц}} - 0,5d). \quad (5.25)$$

В заключение следует заметить, что на практике кривую, описывающую профиль зуба шлицевой фрезы, как правило, заменяют дугой окружности. Для этого по формулам (5.13) и (5.14) рассчитывают координаты X_i и Y_i трех точек профиля фрезы, а затем через эти точки аналитически проводят дугу окружности, то есть определяют радиус r этой дуги и координаты x_c и y_c ее центра.

Проверку допустимости замены кривой, описывающей профиль зуба, дугой окружности проводят по двум точкам профиля, расположенным между тремя исходными. Если какая-либо из этих точек не ложится на дугу с заданной точностью (обычно порядка 50 мкм), то ее выбирают в качестве точки системы уравнений (вме-

сто одной из взятых первоначально), пересчитывают значения ρ , x_c , y_c и вновь проверяют их по двум оставшимся точкам.

Выводы

1. Чтобы использовать всё поле допуска на изготовление шлицевого вала, теоретический профиль червячной фрезы рассчитывают, исходя из специальным образом скорректированных размеров исходного профиля вала.

2. Линия профилирования при обкатке прямобочных профилей представляет собой кривую с экстремальной точкой.

3. Червячные фрезы для обработки шлицевых валов с различным способом центрирования имеют зубья различной конфигурации.

4. Сложную кривую, описывающую боковую поверхность зуба фрезы, как правило, заменяют дугой окружности.

Вопросы для самоконтроля

1. Из каких соображений определяют расчетные размеры шлицевого вала при проектировании червячной фрезы для обработки этого вала?
2. Как относительно полюса зацепления располагается экстремальная точка линии профилирования фрезы для обкатки прямобочных шлицев?
3. В каком диапазоне должен находиться радиус центроиды при обкатке шлицевого вала?
4. Верно ли утверждение, что координаты любой точки линии профилирования не зависят от числа зубьев шлицевого вала?
5. Каковы особенности проектирования фрез для обработки валов с центрированием по наружному диаметру или боковым поверхностям шлица?
6. Какой параметр при проектировании фрез для обработки валов с центрированием по наружному диаметру рассчитывают, исходя из требования к длине прямолинейного участка профиля шлица?
7. Каковы особенности проектирования фрез для обработки шлицевых валов с центрированием по внутреннему диаметру?

8. С какой целью зубья фрез для обработки шлицевых валов с центрированием по внутреннему диаметру снабжают «усиками»?
9. Верно ли утверждение, что все фрезы для изготовления шлицевых валов не обрабатывают наружные диаметры этих валов?
10. Каким образом проводят проверку допустимости замены кривой, описывающей профиль зуба фрезы, дугой окружности?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конкретные режущие инструменты имеют свои, присущие только им особенности. Вместе с тем сопоставление методов конструирования отдельных инструментов позволяет выявить некоторые общие принципы, лежащие в основе их проектирования, независимо от назначения и типа инструмента. К этим принципам относятся, прежде всего, единый подход к анализу геометрии режущих лезвий и поверхностей. Геометрические параметры инструментов любой формы и назначения рассчитывают на основе формул, описывающих взаимосвязь между основными геометрическими параметрами элементарного режущего клина, модифицируя эти формулы в соответствии с условиями конкретной задачи. Применяя формулы единой геометрии, решают вопрос об углах инструмента, в частности, определяют заданные или необходимые их значения на тех участках режущих кромок и поверхностей, где складываются наилучшие условия резания.

Единый подход имеет место и при профилировании инструментов, предназначенных для изготовления сложных поверхностей. Он состоит в том, что по заданному профилю изделия определяют профиль передней поверхности инструмента и профиль в плоскости, нормальной к его задней поверхности. Первый из них, как правило, используют для контроля инструмента, а второй — для проектирования инструментов второго порядка. В случае если изделие изготавливают методом огибания, профиль инструмента определяют на основе закономерностей, справедливых для обкатки сопряженных тел.

Единый подход может быть реализован и при оптимизации элементов конструкции инструмента. Оптимизация требует математического описания целевой функции и технических ограничений, определяющих границы области возможных значений искомых параметров. Оптимизации может подвергаться значение одного какого-либо параметра (например, смещения исходного контура долбяка) или комплекса параметров (например, подъема на зуб и количества черновых режущих зубьев протяжки).

В процессе проектирования применяют единый подход для обеспечения возможно большего срока службы режущих инструментов. Кроме выбора рациональных марок инструментальных материалов, улучшения свойств рабочих поверхностей, рациональной системы охлаждения и т. д. применяют общие правила определения номинальных размеров и допусков на изготовление калибрующих элементов инструмента. Номиналы, в том числе и для комплекса размеров, характеризующих исходный профиль сложных инструментов, располагают так, чтобы наилучшим образом использовать поле допуска на изготовление изделий, а допуск на калибрующие размеры — так, чтобы получить наибольший возможный запас на износ инструмента в процессе эксплуатации.

Развитие и совершенствование перечисленных выше принципиальных направлений в конструировании инструментов представляют собой важную задачу науки и производства. В предлагаемом пособии сделана попытка показать, как изложенные выше общие принципы реализуются при проектировании режущих инструментов, предназначенных для изготовления изделий сложного профиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 томах. Том 1 / В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой. — 8-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2001. — 920 с. — ISBN 5-217-02963-3.
2. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 томах. Том 2 / В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой. — 8-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2001. — 900 с. — ISBN 5-217-02964-1.
3. ГОСТ 1139—80. Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шлицевые прямобочные. Размеры и допуски : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 3 июня 1980 года № 2516 : взамен ГОСТ 1139—58 : дата введения 1982-01-01 / разработан и внесен Государственным комитетом СССР по стандартам. — Изд. с Изменениями № 1, 2. — Москва : Издательство стандартов, 2003. — 9 с.
4. ГОСТ 13755—2015. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходные контуры : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по переписке (протокол от 27 августа 2015 года № 79-П) : взамен ГОСТ 13755—81 : дата введения 2017-01-01 / подготовлен ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». — Москва : Стандартиформ, 2016. — III, 11, [1] с.
5. ГОСТ 16530—83. Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 31 января 1983 года № 557 : взамен ГОСТ 16530—70 : дата введения 1984-01-01. — Переизд. — Москва : Издательство стандартов, 2004. — 50 с.
6. ГОСТ 4044—70. Хвостовики круглые для протяжек. Типы и основные размеры : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 мая 1970

- года № 747 : взамен ГОСТ 4044–61 : дата введения 1971-07-01 / разработан и внесен Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР ; разработчики: Л. В. Барон, А. И. Либерман. — Переизд. с Изменениями № 1, 2. — Москва : Издательство стандартов, 2004. — 6 с.
7. ГОСТ 6636–69. Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные линейные размеры : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21 июля 1982 года № 2766 : взамен ГОСТ 6636–60 : дата введения 1970-01-01 / разработан и внесен Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. — Изд. с Изменениями № 1, 2. — Москва : Издательство стандартов, 2004. — 5 с.
 8. ГОСТ 9323–79. Долбяки зуборезные чистовые. Технические условия : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 17 августа 1979 года № 3161 : взамен ГОСТ 9323–60 : дата введения 1981-01-01. — Переизд. с Изменениями № 1, 2. — Москва : Издательство стандартов, 1987. — 69 с.
 9. Иноземцев, Г. Г. Проектирование металлорежущих инструментов : учеб. пособие для вузов / Г. Г. Иноземцев. — Москва : Машиностроение, 1984. — 271, [1] с.
 10. Киреев, Г. И. Проектирование метчиков и круглых плашек : учеб. пособие / Г. И. Киреев ; Ульяновский государственный технический университет. — Ульяновск : УлГТУ, 2008. — 106, [1] с. — ISBN 978-5-9795-0252-6.
 11. Металлорежущие инструменты : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г. Н. Сахаров, О. Б. Арбузов, Ю. Л. Боровой [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1989. — 328 с.
 12. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов : справочник / В. И. Баранчиков, А. В. Жаринов, Н. Д. Юдина, А. И. Садыхов [и др.] ; под общ. ред. В. И. Баранчикова. — Москва : Машиностроение, 1990. — 399 с.

13. Резников, А. Н. Режущий инструмент для изготовления сложных поверхностей и инструментальное обеспечение автоматизированного производства : конспект лекций : Разделы Б, В / А. Н. Резников ; Тольяттинский государственный университет. — Тольятти : ТолПИ, 1991. — 218 с.
14. Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов : учеб. пособие для вузов / Г. Н. Кирсанов, О. Б. Арбузов, Ю. Л. Боровой, В. А. Гречишников; под общ. ред. Г. Н. Кирсанова. — Москва : Машиностроение, 1986. — 288 с.
15. Семенченко, И. И. Проектирование металлорежущих инструментов : учеб. пособие для вузов / И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров ; под ред. И. И. Семенченко. — Москва : Машгиз, 1963. — 952 с.
16. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов, А. Н. Шевченко [и др.] ; под общ. ред. И. А. Ординарцева. — Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987. — 846 с. — (Библиотека инструментальщика).
17. Справочник инструментальщика-конструктора / В. И. Климов, А. С. Лернер, М. Д. Пекарский [и др.]. — Изд. 2-е, доп. и перераб. — Москва [и др.] : Машгиз, 1958. — 608 с.

ГЛОССАРИЙ

Безвольфрамовые твердые сплавы — инструментальные материалы, получаемые спеканием под давлением зерен карбида и карбонитрида титана в никель-молибденовой связке.

Быстрорежущие стали — инструментальные стали, легированные вольфрамом, молибденом, кобальтом и ванадием в больших количествах (до 25 %).

Главная секущая плоскость — условная плоскость, определяющая взаимное положение режущего инструмента и заготовки в процессе обработки. Проходит по нормали к проекции главной режущей кромки на *основную плоскость* в данной ее точке.

Двухкарбидные твердые сплавы — инструментальные материалы, получаемые спеканием под давлением зерен карбидов вольфрама и титана в кобальтовой связке.

Долбяк — режущий инструмент для изготовления зубчатых колес по схеме «колесо — колесо», имеющий *центроиду* в виде окружности.

Зубострогальная гребенка — режущий инструмент для изготовления зубчатых колес по схеме «рейка — колесо», имеющий *центроиду* в виде прямой линии.

Исходный профиль — конфигурация главных режущих кромок в *основной плоскости* инструмента.

Нитридная керамика — инструментальный материал на основе нитрида кремния, получаемый методом порошковой металлургии.

Однокарбидные твердые сплавы — инструментальные материалы, получаемые спеканием под давлением зерен карбида вольфрама в кобальтовой связке.

Оксидная керамика — инструментальный материал на основе окиси алюминия, получаемый методом порошковой металлургии.

Оксидонитридная керамика — инструментальный материал на основе композиции окиси алюминия и нитрида титана, получаемый методом порошковой металлургии.

Оксикарбидная керамика — инструментальный материал на основе композиции окиси алюминия и карбида титана, получаемый методом порошковой металлургии.

Осевая секущая плоскость — условная плоскость, определяющая взаимное положение режущего инструмента и заготовки в процессе обработки. Проходит через данную точку главной режущей кромки параллельно направлению продольной подачи инструмента.

Основная плоскость — условная плоскость, определяющая взаимное положение режущего инструмента и заготовки в процессе обработки. Проходит перпендикулярно вектору скорости главного движения резания в данной точке режущей кромки инструмента.

Плоскость резания — условная плоскость, определяющая взаимное положение режущего инструмента и заготовки в процессе обработки. Проходит касательно к главной режущей кромке в данной ее точке и перпендикулярно *основной плоскости*.

Промежуточный профиль — конфигурация главных режущих кромок в плоскости передней поверхности инструмента.

Радиальная секущая плоскость — условная плоскость, определяющая взаимное положение режущего инструмента и заготовки в процессе обработки. Проходит через данную точку главной режущей кромки перпендикулярно направлению продольной подачи инструмента.

Термостойкость — способность инструментальных материалов сохранять физико-механические характеристики (в частности, прочность) при повышении температуры.

Трехкарбидные твердые сплавы — инструментальные материалы, получаемые спеканием под давлением зерен карбидов вольфрама, титана и тантала в кобальтовой связке.

Углеродистые инструментальные стали — низколегированные аустенитные стали, содержащие около 1 % углерода.

Центроиды — условные линии, которые без проскальзывания обкатываются друг по другу при работе кинематической пары.

Черновая гребенка — обкатной режущий инструмент, предназначенный для предварительной прорезки впадин зубчатых колес.

Чистовая гребенка — обкатной режущий инструмент, предназначенный для окончательной прорезки впадин зубчатых колес.

Шевер — обкатной инструмент для чистовой обработки боковых поверхностей зубьев эвольвентного зацепления, работающий по схеме «колесо — колесо».

Шлифовочная гребенка – обкатной режущий инструмент, предназначенный для обработки профиля зубьев колеса с припуском на последующую шлифовку.

Шлифуемый профиль – конфигурация главных режущих кромок инструмента в плоскости, нормальной к его задней поверхности.

Эльбор – синтетический сверхтвердый инструментальный материал на основе кубического нитрида бора.