

В той же нашей работе [4] приводится одно из таких решений. Комбинированный долбяк, имеющий заборную часть, черновые и чистовые зубья и свободный от зубьев промежуток для снятия и установки заготовки, нарезает семь заготовок, расположенных на отдельных шпинделях вокруг долбяка. Они совершают планетарное движение обката — вращение вокруг оси долбяка и вращение вокруг собственной оси.

Время обработки при нарезании, например, колес $m = 3$ мм, $z = 40$, $b = 30$ мм составляет 0,85 мин. на одно колесо, в то время как такое же колесо нарезается зубодолбежной головкой в 1 мин., а шевингуется в 1,4 мин.¹

Изложенный выше краткий обзор показывает, насколько широка и многообразна область применения зуборезных долбяков и что они и впредь останутся одним из важнейших зуборезных инструментов, имеющих свою специфику применения в современном машиностроении.

До последнего времени геометрия режущих элементов зуборезных инструментов оставалась без серьезных изменений. Это обусловлено тем, что у них изменение в более или менее значительных пределах геометрических параметров режущей части, как правило, приводит к значительным изменениям профиля инструмента, выходящим за пределы допусков на этот профиль. В данной работе уделяется значительное внимание вопросу о возможности и целесообразности тех или иных изменений этих геометрических параметров.

В настоящей работе кратко излагаются также результаты наших экспериментальных исследований геометрических параметров режущих элементов зуборезных долбяков. Выводы из этих исследований могут быть распространены и на другие зубодолбежные инструменты. Подробное изложение этих исследований содержится в ранее выпущенной работе автора [9].

Сокращенный объем данной работы не позволил автору поставить ряд существенных вопросов, относящихся к вопросам зубодолбления: получение долблением фланкированных зубчатых колес, нарезание колес долбяками под последующее шевингование, зубодолбление при помощи зубодолбежных головок и др.

¹ По данным зуборезной лаборатории ВНИИ ММ СССР.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Значения индексов

$и$ — инструмент; 1 — колесо, нарезаемое инструментом; 2 — парное колесо.
 $д$ — делительная окружность; $о$ — основная окружность; $е$ — окружность выступов; $і$ — окружность впадин; $1и$ — величины, относящиеся одновременно к колесу и инструменту; 12 — величины, относящиеся к парным колесам; $ф$ — фланк;
 $ш$ — шлифовальный круг; $ε$ — вершина зубьев; $б$ — боковая сторона зубьев.
 Обозначения расположены в порядке латинского и греческого алфавитов

A_0 — межцентровое расстояние нулевых колес в мм.

$A_{1и}, A_{2и}, A_{12}$ — межцентровое расстояние колеса и долбяка и корригированных колес в мм.

a — величина исходного расстояния долбяка в мм.

b — ширина обода нарезаемого колеса в мм.

c — радиальный зазор в мм.

c' — коэффициент радиального зазора.

d — диаметр окружности в мм.

$d_{ди}, d_{д1}, d_{д2}$ — диаметр делительной окружности в мм.

$d_{ои}, d_{о1}, d_{о2}$ — диаметр основной окружности в мм.

$d_{ни}, d_{н1}, d_{н2}$ — диаметр поллюидной (начальной) окружности в мм.

$d_{ш}$ — диаметр шлифовального круга в мм.

f' — коэффициент высоты головки зуба колеса.

H — высота долбяка вдоль оси в мм.

$h'_и, h'_1, h'_2$ — высота головки зуба в мм.

$h''_и, h''_1, h''_2$ — высота ножки зуба в мм.

h_3 — глубина захода зубьев парных колес в мм.

h'_c — станочная высота головки зуба (расстояние по радиусу между начальной окружностью и окружностью выступов) в мм.

h''_c — станочная высота ножки зуба в мм.

$h_\phi = 0,45m$ — высота фланка зубчатой рейки в мм по стандарту.

$h_{\phiи}$ — высота фланка зуба долбяка (высота утолщения ножки зуба) в мм.

h_δ — высота среза головки зуба рейки или колеса неэвольвентным участком зуба долбяка в мм.

h^*_m то же в относительной величине (для $m = 1$) в мм.

m — модуль.

n — толщина среза головки зуба рейки или колеса не-эвольвентным участком ножки зуба долбяка, она же толщина подрезания ножки зуба колеса головкой зуба парного колеса.

n' — то же в относительной величине.

$n_{\phi u}$ — толщина фланкирования зуба долбяка.

O_u, O_1, O_2 — центры долбяка и колес.

R_{eu}, R_{e1}, R_{e2} — радиус окружности выступов в *мм*.

R_{iu}, R_{i1}, R_{i2} — радиус окружности впадин в *мм*.

$R_{к'}$ — радиус нижней точки активной части профиля зуба колеса в *мм*.

$R_{к}$ — радиус верхней точки переходной кривой на зубе колеса в *мм*.

$r_{\partial u}, r_{\partial 1}, r_{\partial 2}$ — радиус делительной окружности в *мм*.

r_{ou}, r_{o1}, r_{o2} — радиус основной окружности в *мм*.

r_u, r_1, r_2 (r_{nu}, r_{n1}, r_{n2}) — радиус начальной (поллоидной) окружности в *мм*
 r_a — радиус захода.

$r_{ou\phi}$ — радиус основной окружности эвольвенты фланка долбяка в *мм*.

$s_{кр}$ — круговая подача на один двойной ход долбяка в *мм*.

s_{rad} — радиальная подача в *мм*.

$S_{\partial u}, S_{\partial 1}, S_{\partial 2}$ — толщина зуба по дуге делительной окружности в *мм*.

S_e — толщина зуба по дуге окружности выступов в *мм*.

S_i — толщина зуба по дуге окружности впадин в *мм*.

S_{nu}, S_{n1}, S_{n2} — толщина зуба по дуге начальной (поллоидной) окружности в *мм*.

$T_{м}$ — машинное время обработки в мин.

t — шаг зацепления в *мм*.

v — скорость резания в *м/мин*.

x — величина сдвига исходного контура рейки в *мм*.

z_u, z_1, z_2 — число зубьев.

α_a — задний угол на вершинах зубьев долбяка в градусах.

α_b — расчетный боковой задний угол долбяка (задний угол в сечении делительным цилиндром) в градусах.

α_{oc} — задний боковой угол долбяка в сечении, нормальном к профилю (в сечении по основному цилиндру), в градусах.

α_{∂} — профильный угол исходного контура рейки в градусах.

α_u — профильный угол исходного контура рейки боковой поверхности зуба долбяка в градусах.

α_{ϕ} — угол фланка на рейке в градусах.

$\alpha_{\partial\phi} = \alpha_{\partial} + \alpha_{\phi}$ — профильный угол исходного контура рейки фланка в градусах.

α_e, α_i — угол давления на окружности выступов, впадин в градусах.

- α_{1n}, α_{2n} — угол зацепления между долбяком и колесом в градусах.
- γ_a — передний угол на вершинах зубьев долбяка в градусах.
- γ_b — боковой передний угол зубьев долбяка в градусах.
- $\Delta f_e, \Delta f_i$ — погрешность профиля зуба на окружности выступов, впадин в мм.
- ε — коэффициент величины исходного расстояния долбяка.
- θ — угол поворота долбяка между двумя резами.
- λ — угол наклона режущей кромки в градусах.
- ξ_n, ξ_1, ξ_2 — коэффициент величины сдвига исходного контура рейки.
- ξ_a — коэффициент величины воспринимаемого сдвига исходного контура рейки.
- σ_e — коэффициент толщины зуба долбяка по дуге окружности выступов.
- $\omega_n, \omega_1, \omega_2$ — угловая скорость в рад./сек.
-

ГЛАВА I

ГЕОМЕТРИЯ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ДОЛБЯКА С НАРЕЗАЕМЫМ КОЛЕСОМ И ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ ПРИ ЗУБОДОЛБЛЕНИИ

§ 1. СУЩНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ДОЛБЯКА

Зуборезный долбяк, являющийся разновидностью режущего инструмента, представляет собой зубчатое колесо с прямыми или косыми зубьями, снабженное соответствующими углами резания — передними и задними на вершинах и боковых сторонах зубьев. Долбяки изготовляют из термически обработанной инструментальной стали.

С точки зрения теории зацепления эвольвентных зубчатых колес долбяк представляет собой скорректированное зубчатое цилиндрическое колесо, зубья которого образованы путем смещения исходного контура рейки и имеют в каждом сечении, перпендикулярном к оси, свое особое смещение этого контура $x = \xi m$. Для уяснения этого положения рассмотрим производственный способ образования зубьев долбяка путем нарезания их червячной модульной фрезой на станке завода „Комсомолец“ [10].

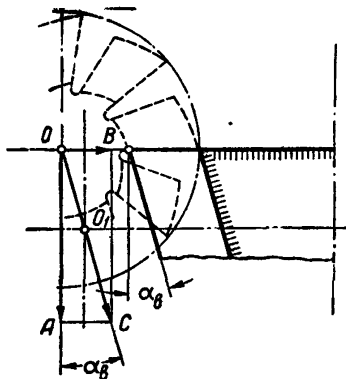
Кинематическая цепь подачи станка настроена таким образом, что червячная фреза (фиг. 1), помимо обычной вертикальной подачи OA вдоль оси изделия, имеет одновременно горизонтальную подачу OB в направлении, перпендикулярном к оси. Величины этих двух подач рассчитаны кинематически таким образом, что результирующая подача фрезы OC направлена наклонно к оси долбяка под углом α_s , равным заднему углу долбяка на вершинах зубьев. По этой схеме нарезания в каждом сечении, перпендикулярном к оси долбяка, фреза будет находиться на определенном расстоянии от оси долбяка, свойственном только данному сечению. В любом другом сечении, перпендикулярном к оси долбяка, это расстояние будет иным. Вследствие этого будет иметь место свое особое смещение исходного контура рейки (фрезы) для каждого сечения.

Таким образом, с точки зрения геометрической теории зацепления эвольвентных зубчатых колес долбяк надлежит рассматривать как совокупность бесконечно большого количества элементарных положительных нулевых и отрицательных зубчатых колес¹ с бесконечно малой шириной

¹ Мы принимаем терминологию, предложенную проф. В. А. Гавриленко [11] вместо наименования „фау-зацепление“, а именно: положительные, отрицательные и нулевые колеса, имеющие соответственно положительное, отрицательное и нулевое смещение исходного контура рейки.

обода, закрепленных на одной оси в порядке убывания величины смещения исходного контура ξm . По мере перетачивания долбяка в работу резания и в зацепление с нарезаемым колесом вступает одно из этих бесконечно тонких зубчатых колес с соответствующей величиной ξm .

Предположим, что в некотором сечении AA (фиг. 2), находящемся от передней плоскости долбяка на расстоянии $+a = \xi m$, смещение исходного контура равно нулю, т. е. $\xi m = 0$. Тогда в этом сечении размеры зубьев долбяка — толщина зуба по дуге делительной окружности и высота головки и ножки — будут равны соответствующим размерам исходного контура рейки долбяка, и потому мы будем впредь называть это сечение исходным сечением долбяка. В исходном сечении долбяк является нулевым колесом: в сечениях, расположенных между исходным сечением и передней гранью, — положительным, а в сечениях, расположенных между исходным сечением и опорной плоскостью долбяка, — отрицательным колесом. Зная размеры зуба долбяка (размеры исходного контура) в этом сечении, можно определить по формулам, приводимым ниже, размеры зуба в любом



Фиг. 1.

другом сечении долбяка, в частности в сечении BB по передней поверхности, как размеры корригированного колеса, имеющего положительное $+\xi m$ или отрицательное $-\xi m$ смещение исходного контура рейки.

Упомянутую выше величину $a = \xi m$, обозначающую расстояние исходного сечения долбяка от передней плоскости долбяка, мы будем называть исходным расстоянием¹, а величину ϵ — коэффициентом исходного расстояния.

Из фиг. 2 вытекает следующая зависимость между смещением контура $x = \xi m$ и величиной исходного расстояния долбяка a :

$$a = \frac{\xi_a m}{\operatorname{tg} \alpha_0}, \quad (1)$$

где α_0 — задний угол на вершине зуба долбяка.

Как известно, толщина зуба корригированного колеса по дуге делительной окружности при смещении $\pm \xi m$ определяется следующим образом:

$$S_d = \frac{\pi m}{2} \pm 2\xi m \cdot \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (2)$$

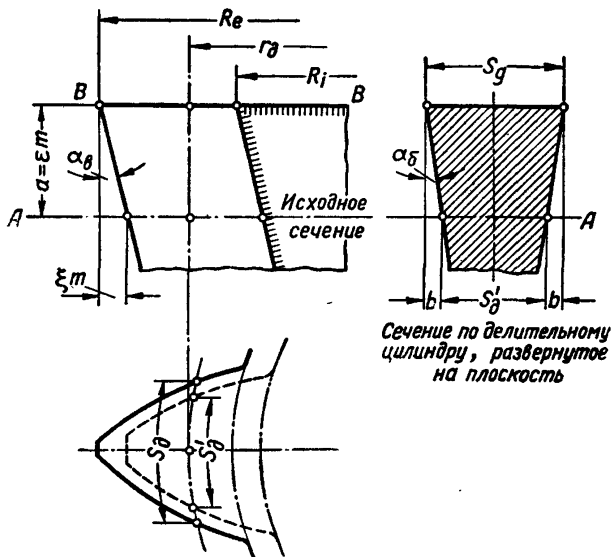
¹ В ГОСТ 321-41 — 330-41 величина a называется смещением исходного сечения. Так как этот термин можно смешать с термином „смещение исходного контура рейки“, обозначающим величину, измеряемую в радиальном направлении, то мы предлагаем для величины a новый термин — „исходное расстояние“.

Соответственно для долбяка, рассматриваемого как корригированное (находящееся в зацеплении) колесо, эта формула принимает следующий вид:

$$S_{\partial u} = \frac{\pi m}{2} \pm 2\xi_u m \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\partial} = \frac{\pi m}{2} \pm 2a \cdot \operatorname{tg} \alpha_s \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\partial}. \quad (3)$$

Детальнее вопрос о размерах зубьев долбяка будет рассмотрен ниже.

Переменное (по высоте долбяка) смещение исходного контура рейки приводит к следующему.



Фиг. 2.

1. Во-первых, долбяк получает указанные выше задние углы на вершине и боковых сторонах зубьев, превращающие его из обычного зубчатого колеса в режущий инструмент.

2. Во-вторых, боковые поверхности зубьев долбяка становятся винтовыми эвольвентными поверхностями. На левых сторонах профилей зубьев (если смотреть на долбяк со стороны передней грани) эти поверхности правоходовые, а на правых сторонах — левоходовые, причем их параметром является величина

$$p = \frac{r_o}{\sin \alpha_u \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\partial}} = \frac{r_o}{\operatorname{tg} \alpha_{oc}},$$

где r_o — радиус основной окружности;

α_{oc} — угол наклона винтовой линии на основном цилиндре, он же задний угол на боковой стороне в сечении по этому цилиндру.

Отсылая читателей к работе инж. М. Белоконь [12], содержащей доказательство этого положения, здесь только укажем на практическую

важность его, а именно: форма боковых поверхностей зубьев в виде эвольвентной винтовой поверхности позволяет шлифовать их плоским кругом, вследствие чего достигается высокая точность обработки. При этом используется то свойство эвольвентной винтовой поверхности, что она является единственной винтовой поверхностью, разворачивающейся на плоскость. Практические методы шлифования боковых поверхностей зубьев долбяков детально изложены в работах автора, Шлеймовича

и Померанца [13], [14] и [15].

В-третьих, в зависимости от величины $\xi_u m$, которая уменьшается по мере стачивания долбяка, нарезаемое колесо и долбяк образуют различные типы зацеплений в отношении суммарного смещения исходного контура, что обуславливает различные геометрические отношения в процессе зацепления долбяка с колесом. Эти отношения будут рассмотрены в следующем параграфе.

В последующем изложении величинам,

относящимся к долбяку, будет присваиваться индекс u , к парным колесам — индексы 1 и 2 и к общим величинам, относящимся к долбяку и колесу или к обоим колесам, например к межцентровому расстоянию, — $1u$, $2u$ и 12 .

Увеличим число зубьев долбяка до бесконечности. Тогда он превратится в зубчатую рейку, имеющую углы резания (в зуборезную гребенку). Если бы этот долбяк-гребенка не имел переднего угла γ_s (фиг. 3), то его профильный угол в сечении NN , перпендикулярном к оси, был бы полностью идентичен с профильным углом нарезаемого колеса, т. е. $\alpha_u = \alpha_d$. В случае же наличия на долбяке переднего угла профиль долбяка в сечении NN , перпендикулярном к оси долбяка, не будет совпадать с профилем проекции передней грани на торец нарезаемого колеса, т. е. $\alpha_u \neq \alpha_d$. Определим, каким должен быть профильный угол долбяка α_u , для того чтобы профильный угол проекции передней грани совпадал с профильным углом нарезаемого колеса. Из фиг. 3 имеем

$$\operatorname{tg} \alpha_u = \frac{e}{h_N} = \frac{e}{h - cb}.$$

Из $\triangle bcd$ и $\triangle acd$ определяем cb :

$$cb = dc \cdot \operatorname{tg} \alpha_s = h \cdot \operatorname{tg} \gamma_s \cdot \operatorname{tg} \alpha_s,$$

тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_u = \frac{e}{h(1 - \operatorname{tg} \gamma_s \cdot \operatorname{tg} \alpha_s)} = \frac{e}{h} \cdot \frac{1}{1 - \operatorname{tg} \gamma_s \cdot \operatorname{tg} \alpha_s} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_d}{1 - \operatorname{tg} \alpha_s \cdot \operatorname{tg} \gamma_s}. \quad (4)$$

Таким образом, чтобы получить на нарезанном долбяком колесе заданный профильный угол α_d , долбяк должен быть изготовлен с профильным углом α_u . Так, например, если принять $\alpha_d = 20^\circ$, $\gamma_s = 5^\circ$ и $\alpha_s = 6^\circ$, то $\alpha_u = 20^\circ 10' 14,5''$. Однако, несмотря на то, что профиль долбяка корректируется в связи с наличием на нем переднего угла, профиль проекции передней грани долбяка на торец колеса, а следовательно и профиль зуба последней, не будет точной эвольвентой. Отступление от эвольвенты обусловлено тем, что эвольвентная винтовая поверхность дает эвольвенту только в сечениях, перпендикулярных к оси винтового движения (к оси долбяка), режущий же профиль долбяка получается в сечении передней гранью, наклоненной к оси под углом $90^\circ - \gamma_s$. Характер и величины отклонений профиля проекции передней грани от эвольвенты детально исследуются в главе II.

Боковые поверхности зубьев долбяка образованы огибающим движением рейки с профильным углом α_u ; поэтому основной цилиндр долбяка должен подсчитываться по формуле

$$d_o = d_d \cdot \cos \alpha_u, \quad (5)$$

где d_d — диаметр делительного цилиндра долбяка. Этот основной цилиндр должен приниматься во внимание при всех расчетах, связанных с эвольвентой боковых поверхностей зубьев долбяка, и при рассмотрении его как геометрического тела.

В работах И. И. Семенченко [1] и Е. Бакингема [16] связь между α_u и α_d определяется следующей формулой (в наших обозначениях):

$$\operatorname{tg} \alpha_u = \operatorname{tg} \alpha_d + \operatorname{tg} \alpha_s \cdot \operatorname{tg} \gamma_s. \quad (a)$$

Эта формула ошибочна, так как при ее выводе принято, что боковая поверхность зуба долбяка образована огибающим движением рейки с профильным углом α_d , а не α_u , как это есть на самом деле.

В работах М. С. Полоцкого [2] и [17] дается следующая также неправильная по той же причине формула:

$$\operatorname{tg} \alpha_u = \operatorname{tg} \alpha_d (1 + \operatorname{tg} \alpha_s \cdot \operatorname{tg} \gamma_s). \quad (6)$$

Однако если в промежуточную формулу Полоцкого (см. [2], стр. 120)

$$\operatorname{tg} \alpha_u = \operatorname{tg} \alpha_d + \operatorname{tg} \alpha_s \cdot \operatorname{tg} \gamma \quad (в)$$

подставить правильное значение α из формулы (25)

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \operatorname{tg} \alpha_s \cdot \operatorname{tg} \alpha_u,$$

то после соответствующих преобразований формула (в) получит вид нашей формулы (4).

При небольших величинах α_d , α_s и γ_s разница между величинами α_u , подсчитанными по различным формулам, незначительна. Но при увеличении α_d и особенно α_s и γ_s эта разница становится весьма значительной.

§ 2. ГЕОМЕТРИЯ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ДОЛБЯКА С НАРЕЗАЕМЫМ КОЛОСОМ

Типы передач колесо — долбяк

Выше было указано, что долбяк в процессе зацепления с нарезаемым колесом может образовывать различные типы передач в зависимости от величины смещения ξ_u того сечения, которым работает долбяк, т. е. в зависимости от степени его сточенности. Выясним эти возможные типы передач.

1. Предположим, что долбяк нарезает нулевое, т. е. некорректированное колесо с $\xi_1 = 0$. Тогда могут встретиться следующие типы передач.

а) Рассмотрим простейший случай, когда долбяк работает исходным сечением, имеющим $\xi_u = 0$. Здесь получается нулевая передача, при которой поллоидные (начальные) окружности долбяка и колеса совпадают с соответствующими делительными окружностями, т. е.

$$r_u = r_{du} \quad \text{и} \quad r_1 = r_{d1}.$$

Поэтому угол зацепления передачи $\alpha_{1u} = \alpha_d$ и межцентровое расстояние

$$A_0 = r_{du} + r_{d1} = \frac{(z_u + z_1)m}{2}.$$

б) Если долбяк нарезает сечением, расположенным выше исходного сечения, то он имеет положительное смещение исходного контура $+\xi_u$ и будет образовывать с колесом положительную передачу, которая характеризуется следующими отношениями: межцентровое расстояние $A_{1u} > A_0$ и угол зацепления $\alpha_{1u} > \alpha_d$. Здесь надо подчеркнуть следующее обстоятельство. Казалось бы, межцентровое расстояние A_{1u} должно определяться следующим образом:

$$A_{1u} = A_0 + \xi_u m, \quad (a)$$

т. е. быть увеличенным против межцентрового расстояния нулевой передачи A_0 на величину смещения исходного контура $\xi_u m$. Однако исследования показывают, что в этом случае

$$A_{1u} < A_0 + \xi_u m$$

и долбяк работает с действительным воспринимаемым, по терминологии В. А. Гавриленко [11], смещением $\xi_{us} < \xi_u$. Это означает, что центр долбяка будет расположен ближе к колесу, чем полагалось бы по уравнению (а), и поэтому высота зуба и радиальный зазор нарезаемого колеса окажутся больше расчетных величин нулевой передачи. При изложенных выше рассуждениях, равно как и при последующих, предполагается, что долбяк нарезает колесо с заданной толщиной зуба, в данном случае, для нулевого колеса, равной $\frac{\pi m}{2}$.

Если бы колесо нарезалось долбяком таким образом, чтобы соблюдалось равенство (а) и тем самым высота зуба и радиальный зазор были бы равны расчетным величинам, то у колеса толщина зуба получилась бы больше расчетной — для рассматриваемой передачи больше $\frac{\pi m}{2}$.