

УДК 621.914.6

В. В. Д е м и д о в

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНО-МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ ДЛЯ КОРРИГИРОВАННЫХ ПРЯМОЗУБЫХ ДОЛБЯКОВ

Рассмотрена задача определения профиля зубьев червячно-модульной фрезы в нормальном сечении для зубофрезерования корригированных прямозубых долбяков, при котором обеспечивается высокая точность профиля зубьев долбяка в торцовом сечении. Задача решена с помощью имитационного компьютерного моделирования. Получены уравнения регрессии для определения углов профиля левой и правой сторон зубьев специальной червячно-модульной фрезы в нормальном сечении.

E-mail: demidova@rambler.ru

Ключевые слова: червячно-модульная фреза, корригированный прямозубый долбяк, угол профиля зуба долбяка, точность профиля зуба долбяка, имитационное компьютерное моделирование.

В настоящее время корригированные долбяки широко используются при изготовлении цилиндрических зубчатых колес, обеспечивая высокую точность и производительность обработки. Важнейшим параметром точности зубчатых колес является точность профиля зубьев, которая непосредственно зависит от точности профиля зубьев долбяка. Точность профиля зубьев долбяка оценивается совпадением проекции его боковых режущих кромок с эвольвентным профилем зубьев основного колеса, на базе которого спроектирован долбяк.

Как известно, одной из основных характеристик эвольвентного профиля зубьев колеса и долбяка является угол профиля эвольвенты на делительной окружности. Из-за наличия передних и задних углов долбяка в целях максимального приближения проекции профиля его боковых режущих кромок на торец обрабатываемого колеса к требуемому эвольвентному профилю зубьев основного колеса вводится коррекция угла профиля зубьев долбяка на его делительной окружности в торцовом сечении. Угол профиля зубьев долбяка в торцовом сечении α_{t1}^p (расчетный угол) определяется по известной зависимости [1]. В технологическом процессе изготовления долбяка расчетный угол профиля его зубьев на делительной окружности должен обеспечиваться зубофрезерованием и последующим зубошлифованием. Для создания равномерного припуска на зубошлифование долбяка необходимо обеспечить равенство углов профиля его зубьев после этих операций.

Невыполнение этого условия приведет к увеличенному припуску по сравнению с технологически обоснованным [2], а также вследствие технологической наследственности [3] — к невысокой точности профиля зубьев долбяка после его зубошлифования. Для получения на операции зубофрезерования расчетного угла профиля зубьев долбяка на его делительной окружности необходимо использовать специальные червячно-модульные фрезы (ЧМФ).

В настоящее время независимо от расчетного угла профиля зубьев долбяка на делительной окружности зубофрезерование долбяков выполняют стандартными ЧМФ с углом α_{n0} в нормальном сечении, равным углу профиля исходного контура зубчатой рейки в соответствии с ГОСТ 13755–81 [4], т.е. $\alpha_{n0} = 20^\circ$. Очевидно, что в этом случае невозможно обеспечить требование равенства углов профиля зубьев долбяка после зубофрезерования и зубошлифования. Для проверки этого утверждения методом имитационного компьютерного моделирования (ИКМ) проведено моделирование процесса зубофрезерования скорректированных прямозубых долбяков с модулем 3 мм, числом зубьев $Z_1 = 15, 45$ и 75 правой односторонней ЧМФ на основе архимедового червяка с 14 прямыми стружечными канавками и наружным диаметром 112 мм. В результате проведенного моделирования установлено существенное несоответствие фактических и расчетных углов профиля зубьев долбяка на делительной окружности после его зубофрезерования, причем это несоответствие возрастает с увеличением значений переднего ($\gamma_{в1}$) и заднего ($\alpha_{в1}$) углов зубьев долбяка (рис. 1). Например, при $\gamma_{в1} = 6^\circ$ и $\alpha_{в1} = 6^\circ$ (рекомендуемые значения переднего и заднего углов долбяка) фактическое значение угла профиля зубьев долбяка $\alpha_{t1}^\phi = 19,88^\circ$ при расчетном его значении $\alpha_{t1}^p = 20,20^\circ$. Это обстоятельство приводит к получению завышенных припусков на зубошлифование долбяков в связи с необходимостью шлифования возникающих при зубофрезеровании стандартными фрезами погрешностей профиля зубьев долбяка. На рис. 2 приведены положения расчетного и фактического эвольвентных профилей зубьев долбяка. На рис. 2 введены следующие обозначения: d_{a1}, d_{f1} — диаметры соответственно окружности вершин и делительной окружности долбяка; $d_{в11}, d_{в12}$ — диаметры основных окружностей соответственно расчетного и фактического профилей зубьев долбяка; $\Delta L_{\max}, \Delta L_{\min}$ — максимальные отклонения фактического профиля зуба долбяка от расчетного профиля соответственно в плюс и в минус по касательным к основным окружностям $d_{в11}$, проходящим через крайние точки фактического профиля зуба долбяка. Сумма абсолютных значений ΔL_{\max} и ΔL_{\min} составляет погрешность профиля зубьев долбяка f_{fr} после зубофрезерования стандартной ЧМФ, которая зависит от значений заднего ($\alpha_{в1}$) и переднего ($\gamma_{в1}$) углов зубьев долбяка (рис. 3).

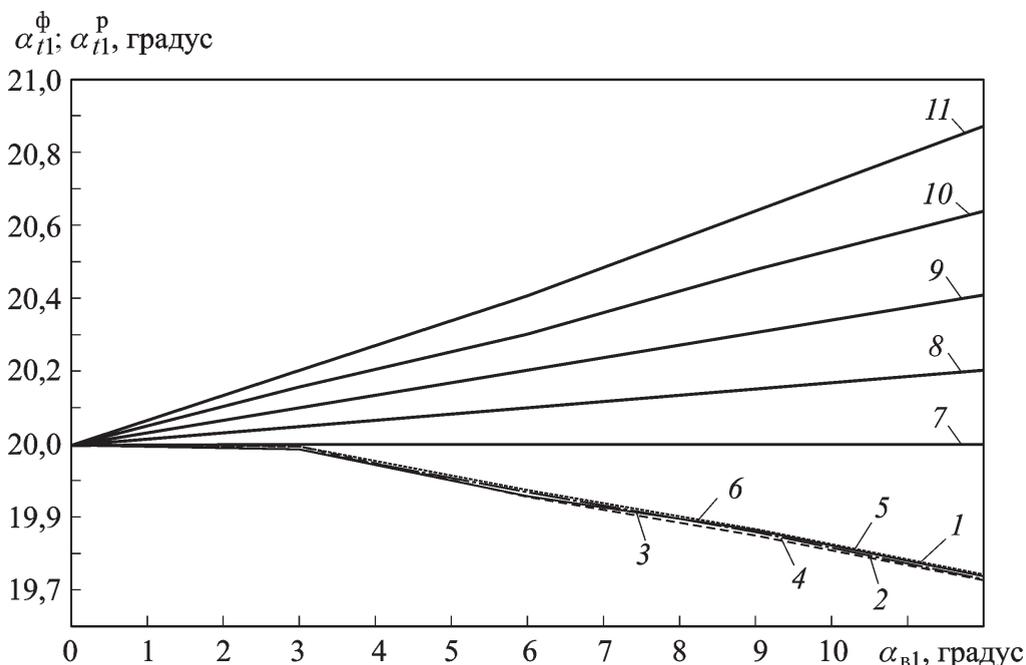


Рис. 1. Влияние заднего ($\alpha_{в1}$) и переднего ($\gamma_{в1}$) углов зубьев долбяка на фактические (α_{t1}^{ϕ}) и расчетные (α_{t1}^p) углы профиля левой и правой сторон зуба долбяка на делительной окружности:

1, 3, 5 — фактические углы профиля левой стороны зуба долбяка с числом зубьев Z_1 , равным соответственно 15, 45, 75 после его зубофрезерования стандартной ЧМФ; 2, 4, 6 — фактические углы профиля правой стороны зуба долбяка с числом зубьев Z_1 , равным соответственно 15, 45, 75 после его зубофрезерования стандартной ЧМФ; 7, 8, 9, 10, 11 — расчетные углы профиля левой и правой сторон зуба долбяка при $\gamma_{в1}$, равном соответственно 0, 3, 6, 9, 12°

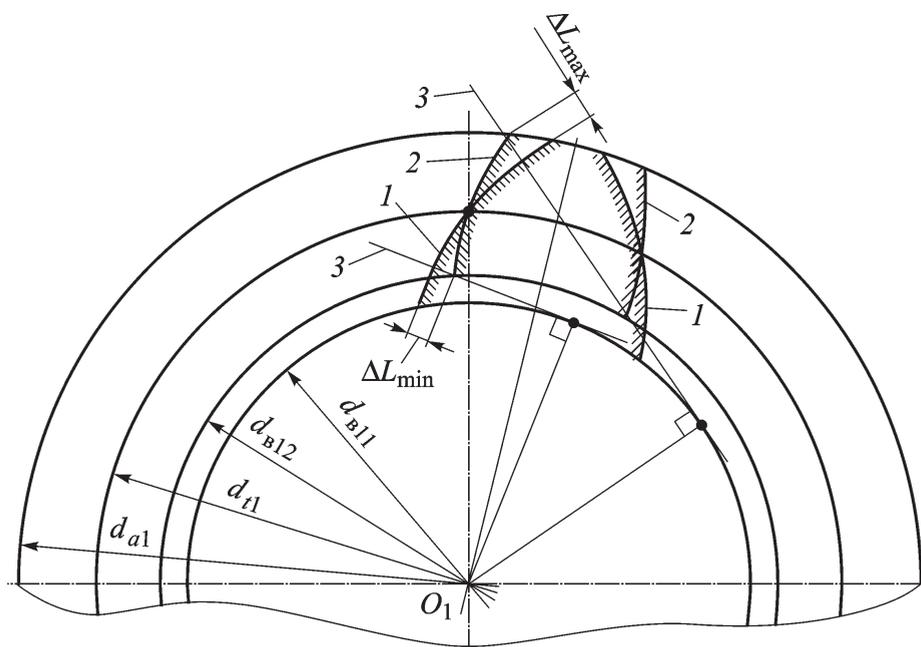


Рис. 2. Схема относительного положения расчетного и фактического эвольвентных профилей зуба долбяка:

1, 2 — соответственно расчетный и фактический профили зуба долбяка; 3 — касательные к основной окружности $d_{в11}$, проходящие через крайние точки фактического профиля зуба долбяка

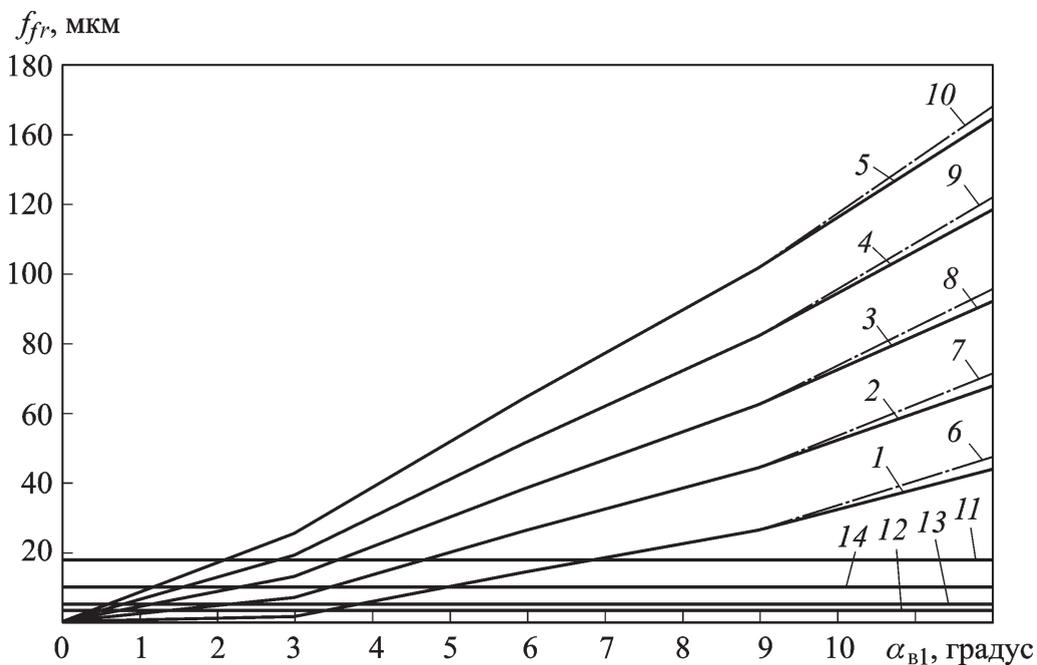


Рис. 3. Влияние заднего (α_{b1}) и переднего (γ_{b1}) углов зубьев долбяка на погрешность профиля f_{fr} левой и правой сторон его зубьев после зубофрезерования стандартной ЧМФ:

1, 2, 3, 4, 5 — погрешность профиля левой стороны зуба долбяка при γ_{b1} , равном соответственно 0, 3, 6, 9 и 12°; 6, 7, 8, 9, 10 — погрешность профиля правой стороны зуба долбяка при γ_{b1} , равном соответственно 0°, 3°, 6°, 9° и 12°; 11 — допускаемая погрешность профиля зубьев колес 8-й степени точности после зубофрезерования; 12, 13, 14 — допускаемая погрешность профиля зубьев долбяков классов точности соответственно АА, А и В после зубошлифования

Для определения угла профиля зубьев специальной ЧМФ в нормальном сечении α_{no} , при котором обеспечивается расчетное значение угла профиля эвольвенты зубьев долбяка в его торцовом сечении α_{t1}^p , воспользуемся вспомогательной зубчатой рейкой, расположенной между зубьями долбяка и ЧМФ. На рис. 4 приведена схема взаимного положения ЧМФ со своей системой координат $X_0Y_0Z_0$ и зубчатой рейки в системе координат обрабатываемого долбяка $X_1Y_1Z_1$. Зубчатая рейка наклонена к оси долбяка под углом, равным половине угла конической поверхности вершин зубьев долбяка α_{k1} . В нормальном сечении зубчатой рейки $N - N$ показаны ее углы профиля левой (α_{nrL}) и правой (α_{nrR}) сторон, в сечении зубчатой рейки $T - T$, параллельном торцу обрабатываемого долбяка, показаны ее углы профиля левой (α_{trL}) и правой (α_{trR}) сторон; ЧМФ движется в направлении вектора S вдоль зубчатой рейки. При зубофрезеровании прямозубых долбяков получены зависимости, позволяющие определить значение угла профиля любой стороны профиля рейки в нормальном сечении α_{nr} по известному углу рейки в торцовом сечении долбяка α_{tr} :

$$\alpha_{nr} = \arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha_{tr}}{\cos \alpha_{k1}}. \quad (1)$$

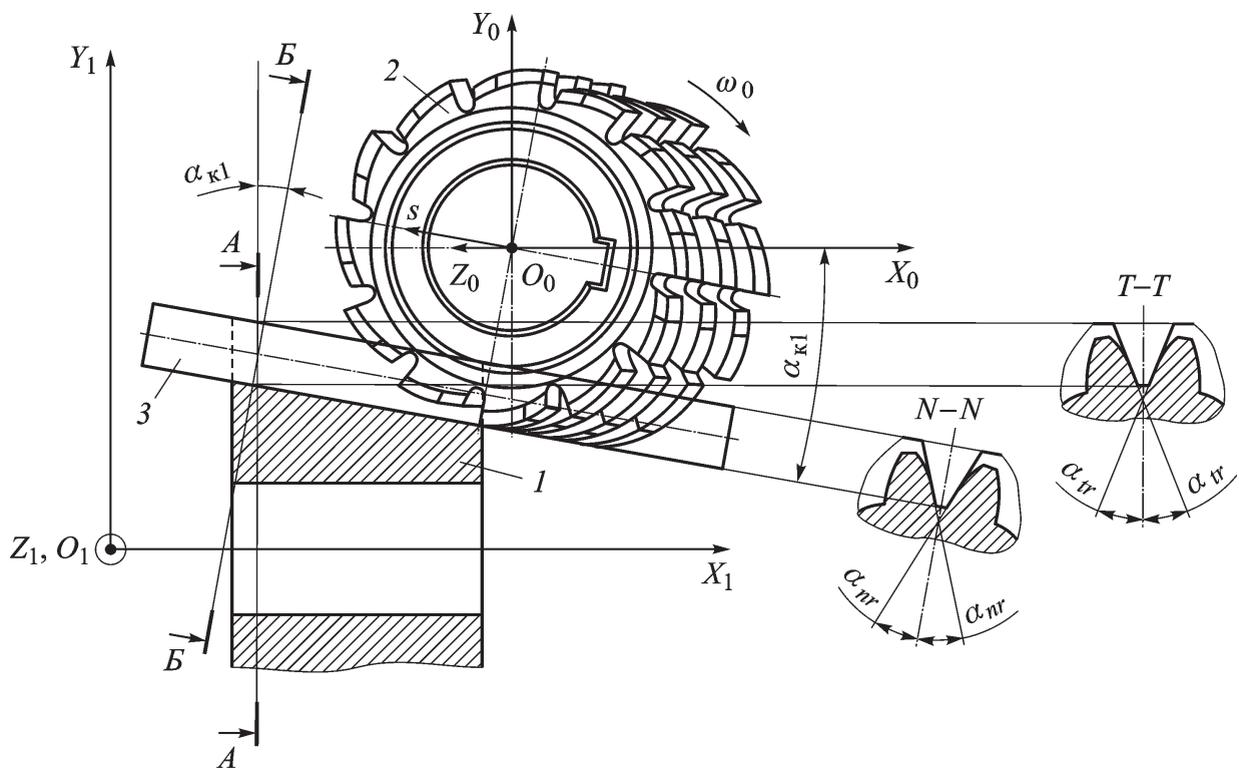


Рис. 4. Положение ЧМФ и зубчатой рейки в системе координат обрабатываемого долбяка:

1 — долбяк; 2 — ЧМФ (на разрезах $N-N$ и $T-T$ условно не показана); 3 — зубчатая рейка

Точное определение угла профиля зубьев специальной ЧМФ в нормальном сечении α_{n0} проводили с помощью ИКМ путем последовательных приближений, включающих следующие действия:

1) определение расчетного значения угла профиля зубьев долбяка на делительной окружности α_{t1}^p по заданным значениям переднего $\gamma_{в1}$ и заднего $\alpha_{в1}$ углов долбяка [1];

2) по известному значению α_{n0} определим угол профиля зубьев ЧМФ в осевом сечении α_{0s0} и соответствующего этому углу профиля режущих кромок (при первом ИКМ процесса зубофрезерования долбяка принимаем $\alpha_{n0} = 20^\circ$) по формуле

$$\alpha_{0s0} = \arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha_{n0}}{\cos \omega_t}, \quad (2)$$

где ω_t — угол наклона винтовой линии зубьев ЧМФ в расчетном сечении на делительном цилиндре;

3) ИКМ процесса зубофрезерования ЧМФ (с профилем режущих кромок зубьев, определенных в п. 2) долбяка с углом $\alpha_{к1}$, равным кинематическому заднему углу на вершине зубьев долбяка $\alpha_{в1}$;

4) определение фактического угла профиля зубьев долбяка в торцовом сечении на делительной окружности α_{t1}^ϕ ;

5) определение $\Delta\alpha_{t1}$ — алгебраической разности углов α_{t1}^p и α_{t1}^ϕ ;

6) коррекция угла профиля рейки в торцовом сечении α_{tr} на угол $\Delta\alpha_{t1}$;

7) определение скорректированного угла профиля рейки в ее нормальном сечении α_{nr} по скорректированному углу профиля рейки в торцовом сечении долбяка α_{tr} (по формуле (1));

8) определение скорректированного угла профиля зубьев ЧМФ в нормальном сечении α_{n0} (принимая $\alpha_{n0} = \alpha_{nr}$);

9) выполнение действий по пунктам 2–9 до тех пор, пока модуль угла $\Delta\alpha_{t1}$ (см. п. 5) не станет меньше заданной точности решения задачи ε (принимая $\varepsilon = 0,0003^\circ$, что соответствует примерно одной угловой секунде).

Полученные по приведенной методике углы α_{n0} для левой (α_{n0L}) и правой (α_{n0R}) сторон зубьев ЧМФ приведены на рис. 5. Как следует из рис. 5, значение углов α_{n0L} и α_{n0R} существенно отличаются от значений углов стандартной фрезы с $\alpha_{n0} = 20^\circ$, при этом имеет место некоторое различие углов α_{n0L} и α_{n0R} . Зубофрезерование прямозубых долбяков специальной ЧМФ с углами профиля ее зубьев в нормальном сечении α_{n0L} и α_{n0R} обеспечивает высокую точность угла профиля зубьев долбяка в торцовом сечении на делительной окружности α_{t1}^ϕ , а следовательно, и высокую точность профиля его зубьев (рис. 6). На рис. 6 видно, что погрешность профиля зубьев долбяка f_{fr} для значений $\gamma_{в1} = 12^\circ$ и $\alpha_{в1} = 12^\circ$ не превышает 4,5 мкм, в то время как при фрезеровании стандартной фрезой $f_{fr} = 150$ мкм (см. рис. 3). Для практического использования результатов исследований при проектировании специальной ЧМФ при зубофрезеровании скорректированных

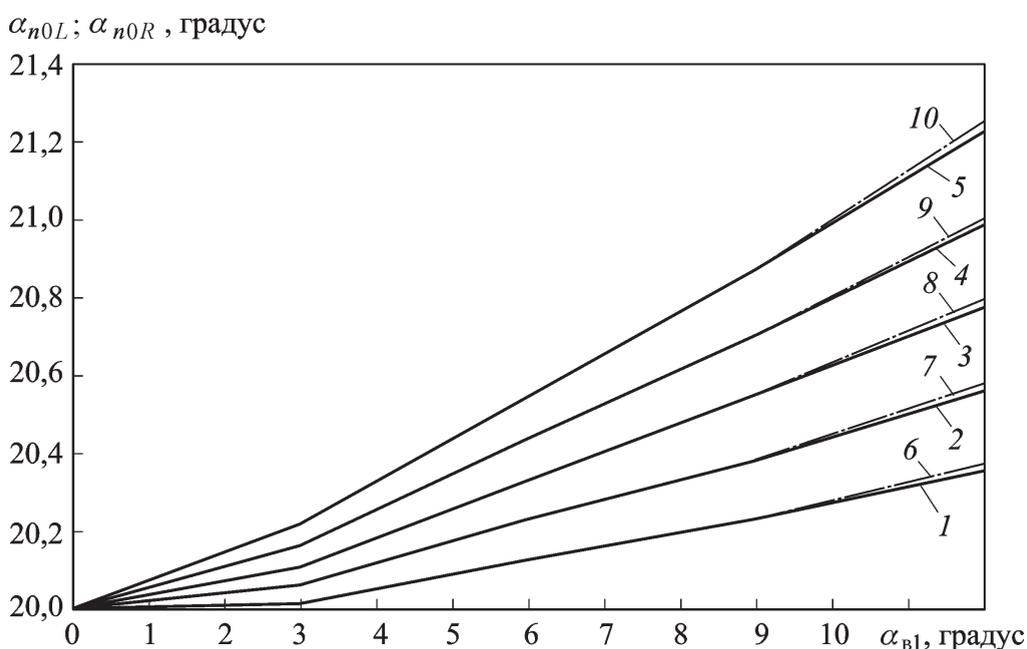


Рис. 5. Влияние заднего ($\alpha_{в1}$) и переднего ($\gamma_{в1}$) углов при вершине зуба долбяка на углы профиля левой (α_{n0L}) и правой (α_{n0R}) сторон зубьев специальной ЧМФ:

1, 2, 3, 4, 5 — углы профиля левой стороны зуба ЧМФ при $\gamma_{в1}$, равном соответственно 0° , 3° , 6° , 9° и 12° ; 6, 7, 8, 9, 10 — углы профиля правой стороны зуба ЧМФ при $\gamma_{в1}$, равном соответственно 0° , 3° , 6° , 9° и 12°

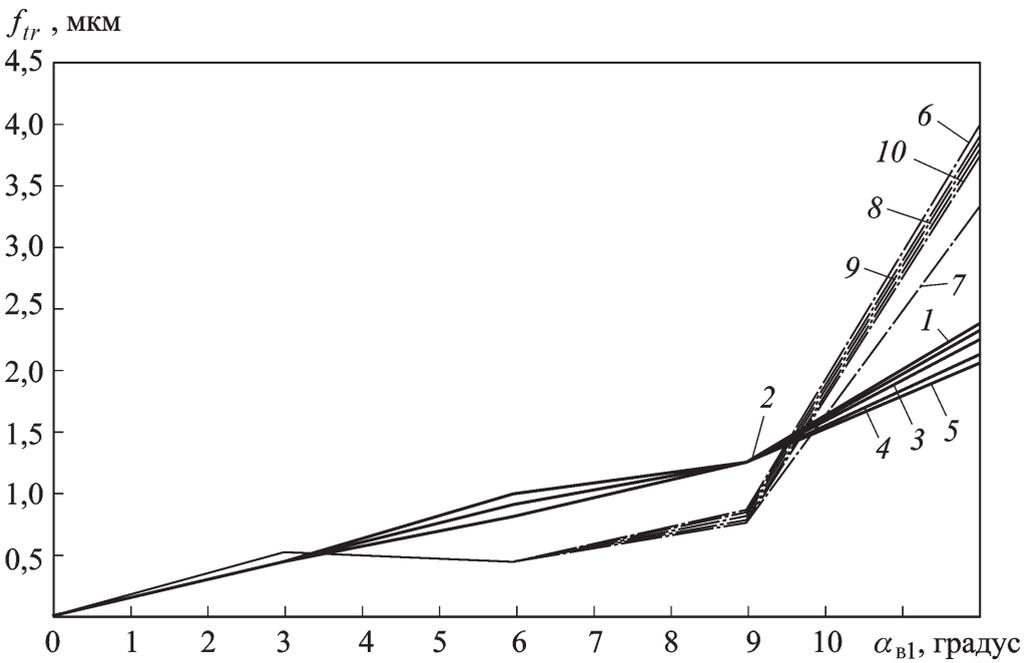


Рис. 6. Влияние заднего (α_{B1}) и переднего (γ_{B1}) углов при вершине зуба долбяка на погрешность профиля f_{fr} левой и правой сторон его зубьев после зубофрезерования специальной ЧМФ:

1, 2, 3, 4, 5 — погрешность профиля левой стороны зубьев долбяка при γ_{B1} , равном соответственно 0° , 3° , 6° , 9° и 12° ; 6, 7, 8, 9, 10 — погрешность профиля правой стороны зуба долбяка при γ_{B1} , равном соответственно 0° , 3° , 6° , 9° и 12°

прямозубых долбяков получены уравнения регрессии, приведенные в таблице, позволяющие при заданных значениях переднего (γ_{B1}) и заднего (α_{B1}) углов зубьев долбяка определить углы профиля левой (α_{n0L}) и правой (α_{n0R}) сторон зубьев ЧМФ в нормальном сечении.

Уравнения регрессии для определения углов профиля левой и правой сторон зуба специальной ЧМФ

Сторона профиля зуба ЧМФ	Уравнения регрессии	Коэффициенты уравнений регрессии
Левая*	$\alpha_{n0L} = A\alpha_{B1}^3 + B\alpha_{B1}^2 + C\alpha_{B1} + D$	$A = 4,363 \cdot 10^{-7}\gamma_{B1}^2 - 3,052 \cdot 10^{-6}\gamma_{B1} + 3,421 \cdot 10^{-4};$ $B = -7,569 \cdot 10^{-6}\gamma_{B1}^2 + 8,738 \cdot 10^{-5}\gamma_{B1} - 0,07;$ $C = 6,707 \cdot 10^{-5}\gamma_{B1}^2 + 0,005\gamma_{B1} + 0,087;$ $D = -8,735 \cdot 10^{-5}\gamma_{B1}^2 + 6,871 \cdot 10^{-4}\gamma_{B1} + 19,808$
Правая*	$\alpha_{n0R} = A\alpha_{B1}^3 - B\alpha_{B1}^2 + C\alpha_{B1} + D$	$A = 6,888 \cdot 10^{-8}\gamma_{B1}^2 + 1,759 \cdot 10^{-7}\gamma_{B1} + 2,547;$ $B = 5,476 \cdot 10^{-8}\gamma_{B1}^2 + 2,391 \cdot 10^{-5}\gamma_{B1} - 0,005;$ $C = 2,055 \cdot 10^{-5}\gamma_{B1}^2 + 0,005\gamma_{B1} + 0,063;$ $D = -1,177 \cdot 10^{-5}\gamma_{B1}^2 + 1,038 \cdot 10^{-4}\gamma_{B1} + 19,861$

* — Левая и правая стороны профиля зуба ЧМФ определяются при виде на его переднюю поверхность и при вершине зуба вверху.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов В. Ф. Расчеты зуборезных инструментов. – М.: Машиностроение, 1969. – 251 с.

2. П о л о х и н О. В. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа. – М.: Машиностроение, 2007. – 240 с.
3. М а т а л и н А. А. Технология машиностроения: Учеб. 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2008. – 512 с.
4. ГОСТ 13755-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передатки зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 7 с.

Статья поступила в редакцию 18.02.2011

Валерий Васильевич Демидов родился в 1951 г., окончил Ульяновский политехнический институт в 1977 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Металлорежущие станки и инструменты” Ульяновского государственного технического университета. Автор около 60 научных работ в области проектирования металлорежущих инструментов.

V.V. Demidov (b. 1951) graduated from the Ul'yanovsk Polytechnic Institute in 1977. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Metal-Cutting Machines and Tools” department of the Ul'anovsk State Technical University. Author of about 60 publications in the field of designing of metal-cutting tools.

