УДК 621.923.1

В. П. Ларшин, д-р техн. наук, проф., **Н. В. Лищенко**, канд. техн. наук, доц.
Одесский национальный политехнический университет, Украина
Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина
Тел./Факс: (0487)85-83-24; E-mail: VPLarshin@rambler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЪЕМА ПРИПУСКА ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ШЛИФОВАНИИ НА СТАНКЕ С ЧПУ

В статье разработана методика определения расчётных параметров съёма припуска при профильном шлифовании – объёмного съёма материала в единицу времени и общего объёма срезаемого материала – путём замены любого произвольного профиля шлифовального круга эквивалентным прямоугольным профилем, который установлен на ту же глубину резания. Приведены данные по определению ширины эквивалентного прямоугольного профиля.

Ключевые слова: *профильное шлифование, объёмный съём материала в единицу времени, общий объём срезаемого материала, эквивалентный прямоугольный профиль, припуск на шлифование*

V. P. Larshin, N. V. Lishchenko

DETERMINATION OF THE STOCK REMOVAL RATE CALCULATION PARAMETERS FOR PROFILE GRINDING ON CNC MACHINE

The paper developed a method of determining the stock removal rate calculation parameters for profile grinding – the specific material removal rate and the volume of cut material - by means of replacing any arbitrary profile of the grinding wheel with the equivalent right-angled profile, which is set to the same depth of cut. The data to determine the width of the equivalent right-angled profile are given.

Key words: *profile grinding, specific material removal rate, volume of cut material, equivalent right-angled profile, grinding stock*

1. Введение

Чистовой финишный процесс по жесткой схеме (без упругих отжатий) является наиболее распространённым на заключительном этапе технологии изготовления зубчатых колёс. В качестве такого процесса используют шлифование, которое наиболее часто производят методом копирования профильным шлифовальным кругом (ШК), т.е. с периодическим прерыванием процесса резания, и методом обката червячным ШК с непрерывной генерацией обработанной зубчатой поверхности. В первом случае (discontinuous profile grinding) пятно контакта между ШК и изделием является постоянным при фиксированном расположении профилей ШК и заготовки зубчатого колеса (ЗК), во втором (continuous generating gear grinding) – переменным.

Для оценки производительности и проектирования шлифовальной операции используется ряд характеристических величин (characteristic values), к числу которых относятся: количество удаляемого в единицу времени материала (material removal rate) Q_w (в мм^3/с), общий объём удаляемого материала V_w (в мм^3) и толщина среза (un-deformed chip thickness). В зарубежной литературе первые два показателя дополнительно приведены к единице эффективной (далее активной) ширины (width) ШК и обозначены соответственно: Q'_w в мм^3/(с·мм) и V'_w в мм^3/мм [1, 2]. В отечественной литературе показатель Q_w (в мм^3/с) называется расчётная интенсивность съёма металла [3] (далее интенсивность шлифования), однако для профильного (фасонного) шлифования отсутствуют методики его определения. Показатель V_w (в мм^3) в отечественной литературе не получил должного распространения по той же причине. В этой связи разработка методики определения показателей Q'_w (specific material removal rate) в мм^3/(с·мм) и V'_w (volume of cut material) в мм^3/мм для любой произвольной формы профиля ШК, в том числе для эвольвентного профиля, относится к числу актуальных задач технологии машиностроения.

В работе [2] отмечается важность указанных выше показателей, названных «характеристическими величинами» (characteristic values), которые могут быть использованы для проектирования операции зубошлифования. Показана аналогия в оценке этих показателей для обычных операций плоского и наружного круглого шлифования с точки зрения постоянства контакта, которое имеет место в этих операциях и при зубошлифовании методом копирования. Эта аналогия заключается в использовании геометрических и кинематических условий для определения показателей Q'_w и V'_w. Например, применительно к схеме плоского шлифования (рис.1) $Q'_w = a_e \cdot V_f$, где a_e и V_f – соответственно, глубина резания (мм) и скорость детали (мм/с) при плоском шлифовании. Аналогичные зависимости можно получить для традиционных схем круглого наружного и внутреннего шлифования, а также для врезного шлифования с поперечной подачей. Эти зависимости для круглого наружного и внутреннего шлифования имеют следующий вид [1].

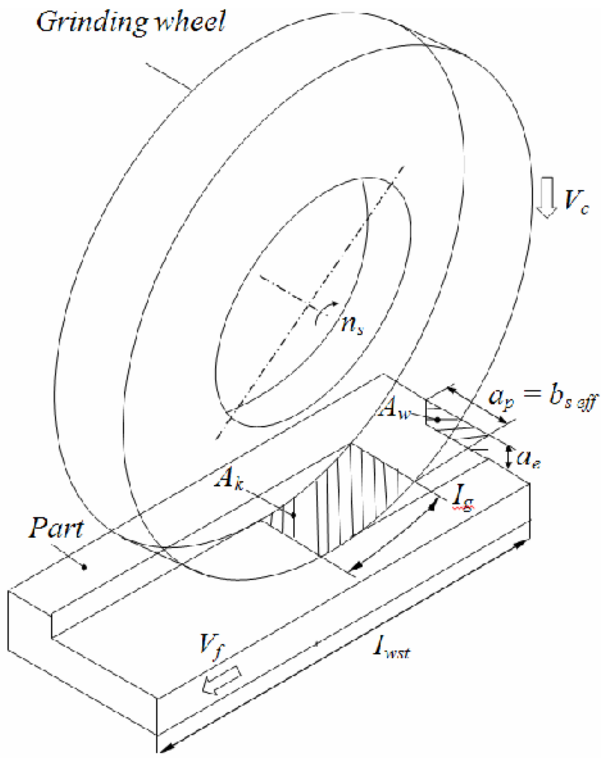

Рис. 1. Схема плоского шлифования на станках с прямоугольным столом [2]

Для продольного шлифования

$$Q'_w = (a_e \cdot n_w \cdot d_w \cdot \pi)/60, \quad (1)$$

где a_e – поперечная подача (глубина резания) на проход, мм; n_w – частота вращения заготовки, мин$^{-1}$; d_w – обрабатываемый диаметр (наружный или внутренний), мм.

Для врезного шлифования

$$Q'_w = (V_{f'} \cdot d_w \cdot \pi)/60, \quad (2)$$

где $V_{f'}$ – поперечная подача на врезание, мм/с;

Однако, применительно к любому сложному профилю, например, эвольвентному, методика определения показателей Q'_w и V'_w в литературе отсутствует.

Это сдерживает развитие эффективных САПР шлифовальных операций, а также встроенных в ЧПУ шлифовального станка компьютерных систем технологической диагностики.

При профильном шлифовании в отличие от прямоугольного шлифования (круглое шлифование с продольной подачей, врезное шлифование) Q_w найти проблематично. Для этого необходимо выполнить интегрирование сложного профиля [4], в том числе с учётом смещения осей профиля инструмента и канавки [5]. Подход с позиции единичного зерна [6] не получил дальнейшего развития в теории производительности шлифования. На основании проведённого теоретического анализа [7] возникла задача разработать инженерный метод, позволяющий упростить определение Q_w. и Q'_w для любой произвольной формы профиля, например, эвольвентной формы.

Цель исследования заключается в разработке способа определения показателей Q'_w и V'_w для любой произвольной формы профиля при профильном шлифовании по жёсткой схеме, например, при зубошлифовании методом копирования на станке с ЧПУ. Для этого необходимо определить площади сечения среза, которые однозначно характеризуют эти показатели.

2. Основное содержание и результаты работы

Для определения понятия «активная ширина профиля» ШК и «активная ширина эквивалентного прямоугольного профиля» (ЭПП) рассмотрим схему на рис.2. На этой схеме треугольный (triangular) профиль ШК (точки *IHE*) расположен симметрично по отношению к профилю предварительно сформированной канавки (точки *IOB*). Выполним геометрический анализ этой схемы.

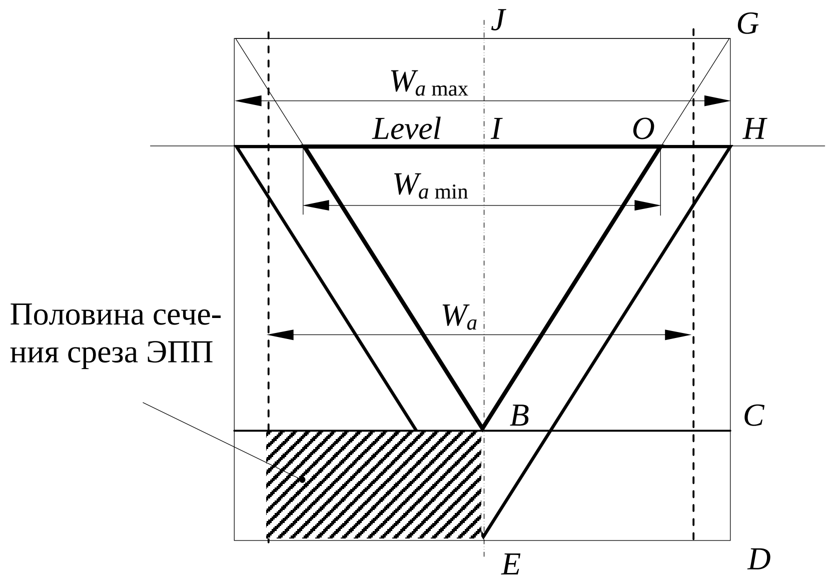

Рис. 2. Определение эквивалентного прямоугольного профиля (ЭПП) для исходного треугольного профиля ШК: W_a – активная ширина ЭПП, $W_{a\max}$ и $W_{a\min}$ – активная ширина треугольного профиля на последующем и предыдущем рабочем ходе

Рассмотрим площади фигур, отмеченные буквами латинского алфавита. Видно, что

$$S_{GHEB} = S_{JGHE} - S_{JGB} \quad (3)$$

Далее могут быть получены следующие соотношения.

$$S_{JGHE} = S_{IHE} + S_{JGHI} \quad (4)$$

Формула (3) с учетом формулы (4) имеет вид

$$S_{GHEB} = (S_{IHE} + S_{JGHI}) - S_{JGB} \quad (5)$$

Из рис.2 следует, что

$$S_{IHE} = S_{JGB} \quad (6)$$

Подставляем формулу (6) в (5) и получаем

$$S_{GHEB} = (S_{JGB} + S_{JGHI}) - S_{JGB} \quad (7)$$

Так как $S_{GHEB} = S_{JGHI}$ и $S_{JGHI} = S_{BCDE}$, то

$$S_{GHEB} = S_{BCDE} \quad (8)$$

Далее видно, что

$$S_{OHEB} = S_{GHEB} - S_{GHO} \quad (9)$$

С учетом формулы (6) формула (7) имеет вид

$$S_{OHEB} = S_{BCDE} - S_{GHO} \quad (10)$$

Отсюда следует, что площадь сечения среза для ЭПП (заштрихованная площадь на рис.2) меньше площади фигуры *BCDE*. Для нахождения площади ЭПП необходимо определить активную ширину ЭПП (W_a на рис.2).

Для определения влияния бокового смещения предварительно обработанной впадины относительно профиля шлифовального круга рассмотрим рис.3, где показано как изменяется форма сечения среза при появлении такого смещения.

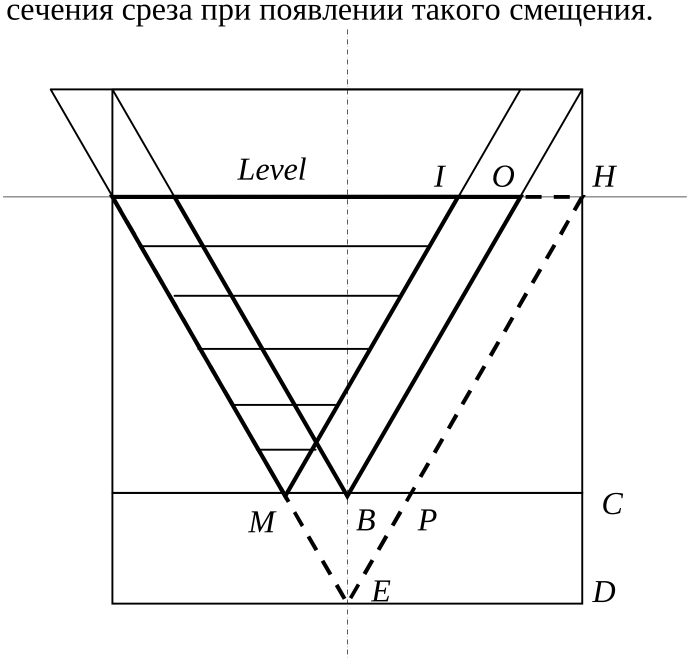

Рис. 3. Схема профильного шлифования треугольным профилем, (профиль ШК расположен несимметрично по отношению к профилю впадины)

Из рис. 3 видно, что

$$S_{IHEM} = S_{OHEB} + S_{IOBEM} . \quad (11)$$

В свою очередь

$$S_{IOBEM} = S_{IOBM} + S_{MBE} , \quad (12)$$

$$S_{MBE} = S_{BPE} , \quad (13)$$

$$S_{OHPB} = S_{IOBM} \quad (14)$$

Кроме того

$$S_{OHEB} = S_{OHPB} + S_{BPE} . \quad (15)$$

С учетом уравнений (13) и (14)

$$S_{IOBEH} = S_{OHEB} . \quad (16)$$

Теперь с учетом (16), уравнение (11) принимает вид

$$S_{IHEM} = 2S_{OHEB} . \qquad (17)$$

Ранее было установлено, что

$$S_{OHEB} = S_{BCDE} - S_{GHO} \text{ или } 2S_{OHEB} = 2S_{BCDE} - 2S_{GHO} .$$

С учетом уравнения (17)

$$S_{IHEM} = 2S_{BCDE} - 2S_{GHO} . \qquad (18)$$

Следовательно, при смещении впадины (из симметричного положения в положение заштрихованного профиля на рис.3) сечение среза становится не симметричным, но площадь этого сечения не изменяется.

3. Расчётные соотношения

Далее рассмотрим более общий случай удаления припуска за один текущий рабочий ход профильного шлифования (рис.4).

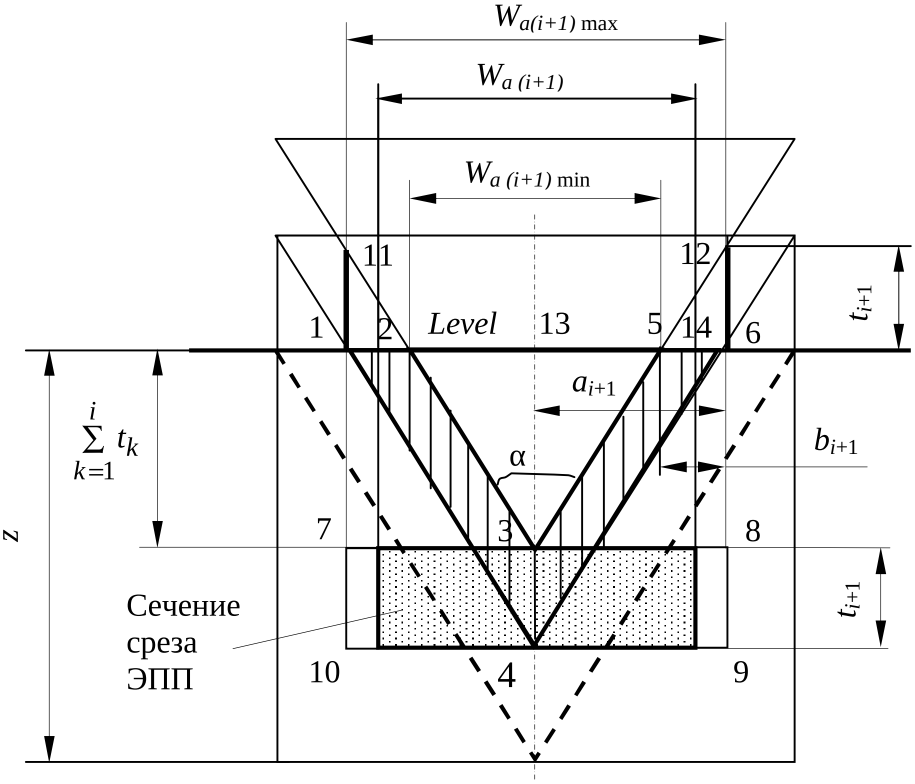

Рис. 4. Расчётная схема для определения активной ширины ЭПП

Зная глубину шлифования $t_{(i+1)}$ на очередной $(i+1)$-й ход определим интенсивность шлифования. Получим (в мм^3/с)

$$Q_{w(i+1)} = S_{i+1} \cdot V , \qquad (19)$$

где S_{i+1} – площадь сечения среза на $(i+1)$-м ходе, мм^2; $V_д$ – скорость детали (скорость шлифовального круга вдоль зубчатого венца, мм/с).

Из предыдущего анализа (рис.1) установлено, что площадь фигуры 1–2–3–5–6–4 (заштрихованная область на рис.3) равна разности площадей прямоугольника 7–8–9–10 и площадей двух одинаковых треугольников 1– 11–2 и 5–12–6.

Запишем площадь сечения среза S_{i+1} в виде

$$S_{i+1} = S_{7\text{-}8\text{-}9\text{-}10} - (2S_{1\text{-}11\text{-}2}) , \quad (20)$$

где $S_{7-8-9-10} = 2(t_{i+1} \cdot a_{i+1})$ – площадь прямоугольника 7–8–9–0; a_{i+1} – половина максимальной активной ширины профиля; $S_{1\text{-}11\text{-}2} = \frac{1}{2} t_{i+1} b_{i+1}$ – площади треугольников 1–11–2 и 5–12–6; b_{i+1} – приращение активной ширины профиля при установке глубины резания $t_{(i+1)}$.

Тогда интенсивность шлифования составляет

$$Q_{w(i+1)} = \left[2(t_{i+1} \cdot a_{i+1}) - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot t_{i+1} \cdot b_{i+1} \right] \cdot V , \quad (21)$$

или

$$Q_{w(i+1)} = \left[2 \cdot t_{i+1} \cdot a_{i+1} - t_{i+1} \cdot b_{i+1} \right] \cdot V = V \cdot t_{+1} \left(2a_{+1} - b_{+1} \right) . \quad (22)$$

Найдем величины a_{i+1} и b_{i+1} из прямоугольных треугольников 4–6–9 и 5–12–6, соответственно. Получим

$$a_{i+1} = \mathrm{tg} \left(t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k \right), \quad (23)$$

где α – половина угла профиля ШК; $\sum_{k=1}^{i} t_k$ – сумма глубин резания до установки глубины t_{i+1}.

$$b_{i+1} = \mathrm{tg} \ t_{i+1} \quad (24)$$

Формула (22) с учетом (23) и (24) примет вид

$$Q_{w(i+1)} = V \cdot t_{+1} \left(2\mathrm{tg} \left(t_{+1} + \sum_{k=1}^{i} t \right) - t_{+1} \cdot \right) =$$

$$= V_д \cdot t_{i+1} \left(2\mathrm{tg} \ \cdot t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k - t_{i+1} \right) =$$

$$= V_д \cdot t_{i+1} \cdot \mathrm{tg} \left(t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k \right)$$

Таким образом, получили следующее выражение для интенсивности шлифования

$$Q_{w(i+1)} = V \cdot t_{+1} \cdot \mathrm{tg} \left(t_{+1} + \sum_{k=1}^{i} t \right) \quad (25)$$

Обозначим величину $\mathrm{tg} \left(t_{i+1} + \sum_{k=1}^{i} t_k \right)$ через $W_{a(i+1)}$. Назовем этот параметр активной шириной ЭПП.

Таким образом,

$$Q_{w(i+1)} = V \ t_{+1} W_{(+1)} , \text{ мм}^3 / \text{с} \quad (26)$$

Рассмотрим половину профиля и соответственно определим положение величины $W_a/2$ на рис. 4.

Длина отрезка 13–5 из прямоугольного треугольника 13–5–3 составляет $\mathrm{tg}\ \sum_{k=1}^{i} t_k$. Длина отрезка 13–6 из прямоугольного треугольника 13–6–4 составляет $\mathrm{tg}\ \left(t_{i+1}+\sum_{k=1}^{i} t_k\right)$. Длина отрезка 5–6 определяется как разность длин двух отрезков: (13–6) – (13–5).

Длина отрезка 5–6: $\mathrm{tg}\ \left(t_{i+1}+\sum_{k=1}^{i} t_k\right) - \quad \sum_{k=1}^{i} t_k = \quad t_{i+1}$

Длина отрезка 13–14 составляет

$$\mathrm{tg}\ \sum_{k=1}^{i} t_k + \frac{\mathrm{tg}\ \ t_{i+1}}{2} = \quad \left(\sum_{k=1}^{i} t_k + \frac{t_{i+1}}{2}\right).$$

Следовательно,

$$W_{a(i+1)} = 2\mathrm{tg}\ \left(\sum_{k=1}^{i} t_k + \frac{t_{i+1}}{2}\right) \quad \sum_{k=1}^{i} t_k \quad \frac{t_{i+1}}{2} \quad \left(\ \sum_{k=1}^{i} t_k + t_{i+1}\right).$$

Параметр $W_{a(i+1)}/2$ соответствует длине отрезка 13–14, который занимает среднее положение между отрезком 13–6 и отрезком 13–5. Эти отрезки, соответственно, равны $\frac{W_{a(i+1)\max}}{2}$ и $\frac{W_{a(i+1)\min}}{2}$.

Таким образом, величина $W_{a(i+1)}$ находится в интервале между значениями $W_{a(i+1)\max}$ и $W_{a(i+1)\max}$, которые в свою очередь представляют собой длины отрезков 2–5 и 1–6, соответственно, т.е. $W_{a(i+1)\min} < W_{a(i+1)} < W_{a(i+1)\max}$, (рис.4).

Докажем, что $W_{a(i+1)}$ находится в вышеуказанном интервале. Для доказательства необходимо показать, что при условии $t_{i+1} \to 0$ имеет место $W_{a(i+1)} \to W_{a(i+1)\min}$, где $W_{a(i+1)\min}$ – предыдущая активная ширина контакта. При условии $t_{i+1} \to 0$ по мере стремления $\sum_{k=1}^{i} t_k$ к величине $\sum_{k=1}^{i} t_k + t_{i+1} = \mathrm{const}$, имеет место условие $W_{a(i+1)} \to W_{a(i+1)\max}$, где $W_{a(i+1)\max}$ – последующая активная ширина контакта.

Рассмотрим условие $W_{a(i+1)\min} = \lim\limits_{t_{i+1}\to 0} W_{a(i+1)}$.

$\lim\limits_{t_{i+1}\to 0} W_{a(i+1)} = 2\mathrm{tg}\ \sum_{k=1}^{i} t_k$. Из рис. 4 видно, что $W_{a(i+1)\min} = 2\mathrm{tg}\ \sum_{k=1}^{i} t_k$.

Рассмотрим условие $W_{a(i+1)\max} = \lim\limits_{t_{i+1}\to 0} W_{a(i+1)}$

Обозначим $\sum_{k=1}^{i} t_k + t_{i+1} = K = \mathrm{const}$. Тогда $\sum_{k=1}^{i} t_k = K - t_{i+1}$. Выражение для определения $W_{a(i+1)}$ принимает вид $W_{a(i+1)} = \mathrm{tg}\ \left(t_{i+1} \quad \left(K \quad t_{i+1}\right)\right)$.

$$\lim_{t_{i+1}\to K} W_{a(i+1)} = \lim_{t_{i+1}\to 0} W_{a(i+1)} = \lim_{t_{i+1}\to 0} \mathrm{tg}\ \left(t_{i+1} + \quad \left(K - t_{i+1}\right)\right) = \quad K \quad .$$

В момент достижения предела $\sum_{k=1}^{i} t_k = K$ (т.к. в этот момент $t_{i+1} = 0$). Следовательно, $\lim_{t_{i+1}\to K} W_{a(i+1)} = 2\text{tg} \sum_{k=1}^{i} t_k$.

Найдем полный диапазон изменения $W_{a(i+1)}$ при условии, что $t_{i+1} \to 0$.

$$\lim_{\sum_{k=1}^{n} t_k \to 0} W_{a(i+1)} = \lim_{\sum_{k=1}^{n} t_k \to 0} \text{tg} \left(\sum_{k=1}^{n} t_k + t_{i+1} \right) =$$

$$\lim_{\sum_{k=1}^{n} t_k \to z} W_{a(i+1)} = \lim_{\sum_{k=1}^{n} t_k \to z} \text{tg} \left(\sum_{k=1}^{n} t_k + t_{i+1} \right) = z \quad ,$$

где z – максимальная глубина впадины по чертежу (сумма напуска и припусков на лезвийную и абразивную обработку впадины).

Таким образом, активная ширина ЭПП на всём интервале 0…z изменяется от 0 до $2z\,\text{tg}$ и для каждой текущей глубины резания $t_{(i+1)}$ изменяется в интервале $W_{a(i+1)\min} < W_{a(i+1)} < W_{a(i+1)\max}$.

4. Выводы и рекомендации

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм определения расчётных параметров съёма припуска при профильном шлифовании, а именно объёмного съёма материала в единицу времени и общего объёма срезаемого материала, в том числе в расчёте на единицу активной ширины реального профиля. В соответствии с этим алгоритмом установлено следующее.

1. При несовпадении осей профиля шлифовального круга и шлифуемой впадины сечение среза становится не симметричным, но площадь этого сечения среза не изменяется по сравнению со случаем совпадения указанных осей. Следовательно, при прочих равных условиях смещение осей профиля шлифовального круга и профиля шлифуемой заготовки не приводит к изменению указанных расчётных параметров съёма припуска.

2. Активная ширина эквивалентного прямоугольного профиля $W_{a(i+1)}$ удовлетворяет условию $W_{a(i+1)\min} < W_{a(i+1)} < W_{a(i+1)\max}$, в котором параметры $W_{a(i+1)\min}$ и $W_{a(i+1)\max}$ представляют собой активную ширину фактического профиля шлифовального круга до и после установки глубины резания этим профилем на очередной (i+1)-й рабочий ход.

3. В общем случае формирования профиля впадины путём удаления слоя напуска и припусков на лезвийную и абразивную операции активная ширина эквивалентного прямоугольного профиля на всём интервале 0…z, изменяется от 0 до $2z\,\text{tg}$, где z – размер впадины обрабатываемой заготовки по чертежу; α – угол при вершине треугольного профиля.

4. Выполненные исследования являются необходимыми для формулирования и доказательства теоремы об эквивалентном прямоугольном профиле. В соответствии с этой теоремой параметры прямоугольного профиля находят исходя из эквивалента ве-

личин расчётных параметров съёма припуска, например, объёмного съёма материала в единицу времени, для эквивалентного прямоугольного и реального профиля.

5. Указанный эквивалентный прямоугольный профиль характеризуется только двумя своими параметрами: глубиной резания (одинаковой для всех точек профиля) и активной шириной профиля, которая определена выше.

5. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее.

1. Разработать методику определения расчётных параметров съёма припуска при профильном шлифовании путём установления условий замены реального профиля шлифовального круга эквивалентным прямоугольным профилем.

2. Установить закономерности формирования расчётных параметров съёма припуска при профильном шлифовании, связанные с постоянством формы профиля шлифовального круга на его разных рабочих ходах по мере снятия припуска на шлифование.

3. Разработать рекомендации для технологической диагностики операции профильного шлифования на станке с ЧПУ, на котором (в отличие от обычного станка) возможен текущий активный контроль величины снимаемого припуска и связанных с ним расчётных параметров профильного шлифования, например, объёмного съёма материала в единицу времени и общего объёма срезаемого материала, в том числе в расчёте на единицу активной ширины реального профиля шлифовального круга.

4. Расширить технологические возможности шлифовального станка с ЧПУ, например, в части своевременного определения момента правки шлифовального круга (по программируемой величине общего объёма срезаемого материала) и по текущей оценке, например, удельной работы шлифования, характеризующей эксплуатационные свойства шлифовального круга и определяемой по величине объёмного съёма материала в единицу времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по зубошлифованию. Reishauer-Winterthur / [Electronic resource]. – Available on: http://www.winterthurtechnology.com Friday, 15 June 2016 12:09:07.

2. Brecher Christian. Local Simulation of the Specific Material Removal Rate for Generating Gear Grinding / Christian Brecher, Fritz Klocke, Markus Brumm, Florian Hübner / GEARTECHNOLOGY. – September/October 2015. – P.86-90.

3. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твёрдых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.

4. Шлифование фасонных поверхностей / А. И. Исаев, А. Н. Филин, М. С. Злотников, В. Ф. Совкин. – М.: Машиностроение, 1980. – 152 с.

5. Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

6. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

7. Ларшин В. П. Теоретический анализ методов наладки зубошлифовального станка с ЧПУ / В. П. Ларшин, Н. В. Лищенко // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы VI Всероссийской межвуз. научн.-техн. конф. – Уфа: УГАТУ, 2016. – С. 181-189.

Поступила в редколлегию 17.06 2016 г.