

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ ПО МЕТОДУ ПРОФИЛЬНОГО КОПИРОВАНИЯ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук (ХНЭУ, Харьков)

Гершиков И.В. (ЗАО “Азовский машиностроительный завод”, Бердянск)

Приведены результаты исследований точности обработки при зубошлифовании по методу профильного копирования

Как известно [1], процесс зубошлифования по методу профильного копирования характеризуется относительно низкой точностью обработки в связи с возникновением значительных сил резания, повышением износа круга и нарушением профиля его рабочей поверхности. Существенным фактором образования погрешностей обработки следует также рассматривать неравномерность снимаемого припуска по причине возникновения термоупругих деформаций зубьев колеса при его термической или химико-термической обработке и неправильной установке круга в обрабатываемой впадине зубчатого колеса. Данные закономерности в меньшей мере проявляются при зубошлифовании по методу обкатывания [2], когда обработка производится по схеме многопроходного шлифования с относительно небольшой глубиной шлифования. При зубошлифовании по методу профильного копирования фактически весь припуск удаляется за один или несколько проходов с большой глубиной шлифования. Поэтому перепад глубин шлифования при обработке двух смежных зубьев колеса приводит к возникновению в технологической системе упругих перемещений и соответственно образованию погрешностей обработки. Очевидно, устранить данные погрешности обработки можно за счет осуществления определенного количества проходов кругов. Однако это ведет к снижению производительности обработки и в целом к снижению эффективности процесса зубошлифования. В связи с этим, актуальны вопросы исследования закономерностей образования погрешностей обработки при зубошлифовании по методу профильного копирования (по причине неравномерности снимаемого припуска) и определения условий их устранения за минимально возможное время обработки. Иными словами, актуальна задача минимизации основного времени обработки при устранении погрешностей обработки, связанных в первую очередь со съемом неравномерных припусков с двух смежных зубьев обрабатываемого колеса.

Для решения данной задачи можно воспользоваться аналитическим решением, приведенным в работе [3]. При зубошлифовании по методу профильного копирования на обеих сторонах рабочих поверхностей конусного круга под углом α (равным углу при вершине конусного круга) будут действовать две различные по величине радиальные составляющие силы резания P_{y1} и P_{y2} (рис. 1). В общем виде каждую из этих сил можно разложить на две составляющие – горизонтальную и вертикальную. Тогда горизонтальные составляющие силы $P_{y,21}$ и $P_{y,22}$ будут изгибать конусный круг, что приведет к деформации элементов технологической системы в горизонтальном направлении при усло-

вии неравенства сил $P_{y.z1}$ и $P_{y.z2}$. Очевидно, чем больше будет разность сил $P_{y.z1}$ и $P_{y.z2}$, тем значительнее будут упругие перемещения, возникающие в технологической системе в горизонтальном направлении. Собственно, разность сил $P_{y.z1}$ и $P_{y.z2}$ и будет определять основную погрешность обработки зубьев

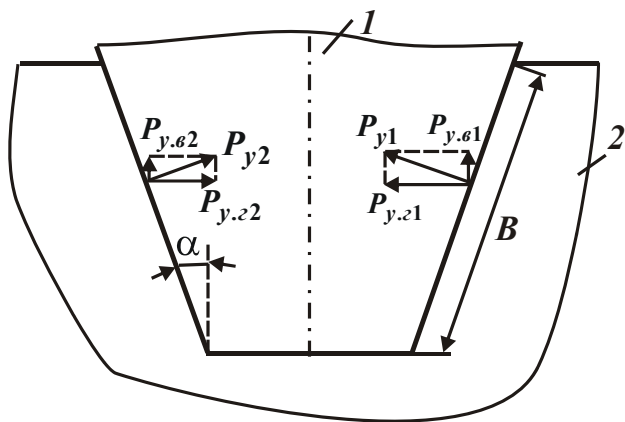


Рис. 1. Расчетная схема параметров процесса зубошлифования по методу профильного копирования: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал.

относительно небольшим углом α . Тем более, что погрешности обработки в вертикальном направлении, вызванные действием сил $P_{y.e1}$ и $P_{y.e2}$, будут осесимметричными по отношению к впадине зубчатого колеса, тогда как погрешности обработки в горизонтальном направлении, вызванные действием сил $P_{y.z1}$ и $P_{y.z2}$, будут несимметричными, устранить которые, естественно, значительно сложнее.

Для упрощения расчетов величину упругого перемещения, возникающего в технологической системе, боковые рабочие поверхности круга будем рассматривать не криволинейными, а прямолинейными. Поскольку при шлифовании в работе участвуют одновременно две стороны круга, то это не внесет принципиальных изменений в выполняемые расчеты. Исходя из этого, величину упругого перемещения y , возникающего в технологической системе в горизонтальном направлении, определим по зависимости:

$$y = \frac{(P_{y.z1} - P_{y.z2})}{C} = \frac{(P_{y1} - P_{y2}) \cdot \cos \alpha}{C} = \frac{(P_{z1} - P_{z2}) \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш}}, \quad (1)$$

где C – жесткость технологической системы в горизонтальном направлении, Н/м; P_{z1} , P_{z2} – соответственно тангенциальные составляющие сил резания, действующих на обеих сторонах шлифовального круга, Н; $K_{ш} = P_{z1} / P_{y1} = P_{z2} / P_{y2}$ – коэффициент шлифования.

С учетом известного отношения [4]:

$$P_z = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}}, \quad (2)$$

колеса в связи с неравномерностью снимаемого припуска.

Вертикальные составляющие силы $P_{y.e1}$ и $P_{y.e2}$ будут как-бы выталкивать шлифовальный круг из впадины зубчатого колеса и формировать погрешность обработки в вертикальном направлении. Однако, данная погрешность обработки будет проявляться в меньшей мере по сравнению с погрешностью обработки в горизонтальном направлении, т.к. горизонтальные составляющие силы $P_{y.z1}$ и $P_{y.z2}$ будут значительно больше вертикальных составляющих сил $P_{y.e1}$ и $P_{y.e2}$ в связи с

представим разность тангенциальных составляющих двух сил резания

$$P_{z1} - P_{z2} = \sigma \cdot \frac{(Q_1 - Q_2)}{V_{кр}} = \sigma \cdot \frac{(V_{дет} \cdot B \cdot \Pi_1 - V_{дет} \cdot B \cdot \Pi_2)}{V_{кр}}, \quad (3)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; Q – производительность обработки, м³/с; $Q_1 = V_{дет} \cdot B \cdot \Pi_1$, $Q_2 = V_{дет} \cdot B \cdot \Pi_2$ – соответственно производительности обработки, условно достигаемые при съеме припусков с двух смежных зубьев колес шлифовальным кругом, м³/с; $V_{дет}$ – скорость перемещения детали вдоль обрабатываемого зуба (скорость детали), м/с; B – длина обрабатываемой части зуба, м; Π_1 , Π_2 – соответственно величины снимаемых припусков с боковых поверхностей двух смежных зубьев колеса (образующих впадину на зубчатом колесе), м.

После преобразования зависимости (1) с учетом выражения (3), получим

$$y = \frac{\sigma \cdot V_{дет} \cdot B \cdot (\Pi_1 - \Pi_2) \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}. \quad (4)$$

Из зависимости (4) следует, что уменьшить величину упругого перемещения y , возникающего в технологической системе в горизонтальном направлении, и соответствующую ей погрешность обработки можно за счет уменьшения отношения $\sigma / K_{ш}$, скорости детали $V_{дет}$, разности снимаемых припусков $(\Pi_1 - \Pi_2)$ и увеличения параметров C и $V_{кр}$. Очевидно, основным путем уменьшения величины y необходимо рассматривать уменьшение разности снимаемых припусков $(\Pi_1 - \Pi_2)$, что достигается обеспечением более равномерных припусков, удаляемых с боковых поверхностей двух смежных зубьев, образующих впадину на зубчатом колесе.

Уменьшать произведение параметров $V_{дет} \cdot B$ нецелесообразно, т.к. это ведет к снижению производительности обработки. Причем, с точки зрения увеличения производительности обработки необходимо параметр B устанавливать близким к длине обрабатываемой боковой поверхности зуба колеса. Это позволит реализовать максимально возможную производительность обработки.

Важным фактором уменьшения величины упругого перемещения y , исходя из зависимости (4), следует рассматривать увеличение скорости круга $V_{кр}$. Вместе с тем, как известно [5], при этом увеличивается условное напряжение резания $\sigma = N / Q$ (где N – мощность шлифования, Вт). В результате отношение $\sigma / V_{кр}$, входящее в зависимость (3.4), будет изменяться по закону изменения тангенциальной составляющей силы резания P_z , т.е. будет уменьшаться, однако незначительно. Следовательно, по такому же закону будет изменяться и величина упругого перемещения y , т.е. будет незначительно уменьшаться. При этом необходимо иметь в виду то, что увеличение условного напряжения резания σ с увеличением скорости круга $V_{кр}$ ведет к увеличению температуры шлифования. Поэтому с целью повышения качества и обеспечения бездефектной обработки скорость круга $V_{кр}$ необходимо уменьшать. Из сказанного выте-

кает, что существует экстремальное значение $V_{кр}$, обеспечивающее выполнение требований по бездефектной обработке (исключение образование прижогов, микротрещин и т.д.) и по точности обработки, т.к. с увеличением скорости круга $V_{кр}$ температура шлифования увеличивается, а погрешность обработки (определяемая величиной y), наоборот, уменьшается. В связи с этим поиск оптимальной скорости круга $V_{кр}$ является одной из основных задач выбора оптимальных условий шлифования.

Чтобы уменьшить отрицательную роль параметра σ в повышении качества и точности обрабатываемых поверхностей, необходимо добиваться его уменьшения. Это достигается на основе повышения режущей способности шлифовального круга и снижения интенсивности трения в зоне шлифования. В этом плане эффективно применение высокопористых абразивных кругов [5], работающих в режиме самозатачивания.

Проведенный выше анализ справедлив при съеме всего припуска при шлифовании за один проход круга. Если же таким путем нельзя добиться требуемой точности обработки, т.е. достичь заданную величину y , то следует производить съем припуска за 2 или большее количество проходов круга, уменьшая на каждом последующем проходе круга погрешности обработки, образованные на предыдущем проходе круга.

Для оценки возможностей уменьшения погрешности обработки, образующейся на втором проходе круга, воспользуемся зависимостью (4), рассматривая в ней величину y как y_2 , а разность снимаемых припусков $\Delta\Pi_1 = \Pi_1 - \Pi_2$ в виде $\Delta\Pi_2 = (t + y) - (t - y)$, где $(t + y)$, $(t - y)$ – соответственно величины снимаемых припусков с боковых поверхностей двух смежных зубьев колеса на втором проходе круга, м; t – глубина шлифования, м; y – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе при первом проходе круга, определяемая зависимостью (4). Очевидно, что

$$\Delta\Pi_2 = 2y. \quad (5)$$

Подставляя зависимость (5) в (4), с учетом $y = y_2$, имеем

$$y_2 = \frac{\sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha \cdot \Delta\Pi_2}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = 0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^2 \cdot \Delta\Pi_1. \quad (6)$$

Очевидно, величина $\frac{\sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$, входящая в зависимость (4),

меньше единицы. Тогда величина $0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^2$, входящая в зависимость (6), будет еще меньше. Следовательно, величина упругого перемещения y_2 , определяемая зависимостью (6), будет меньше величины y , определяемой зависимостью (4), т.е. после второго прохода круга погрешность обработки уменьшится. После третьего прохода круга y_3 определится также по зави-

симости (6), рассматривая в ней вместо величины $\Delta\Pi_2$ величину $\Delta\Pi_3 = (t + y_2) - (t - y_2) = 2 \cdot y_2$, где $(t + y_2)$, $(t - y_2)$ – соответственно величины снимаемых припусков с боковых поверхностей двух смежных зубьев колеса на третьем проходе круга, м. После преобразований зависимости (6), имеем

$$y_3 = \frac{\sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha \cdot \Delta\Pi_3}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = 0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^3 \cdot \Delta\Pi_1. \quad (7)$$

Поскольку $0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^3 < 0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^2$, то

справедливо условие $y_3 < y_2$ и имеет место уменьшение погрешности обработки по мере увеличения количества проходов круга. После n -го прохода круга величина упругого перемещения y_n определится также по зависимости (6), рассматривая в ней вместо величины $\Delta\Pi_2$ величину $\Delta\Pi_n = (t + y_{n-1}) - (t - y_{n-1}) = 2 \cdot y_{n-1}$, где $(t + y_{n-1})$, $(t - y_{n-1})$ – соответственно величины снимаемых припусков с боковых поверхностей двух смежных зубьев колеса на третьем проходе круга, м. Тогда зависимость (6) примет вид

$$y_n = \frac{\sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha \cdot \Delta\Pi_n}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = 0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^n \cdot \Delta\Pi_1. \quad (8)$$

Определим уточнение на каждом проходе круга:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta\Pi_1}{y} = \frac{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{y}{y_2} = \frac{0,5 \cdot C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}; \quad (10)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{y_2}{y_3} = \frac{0,5 \cdot C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}; \quad (11)$$

$$\varepsilon_n = \frac{y_{n-1}}{y_n} = \frac{0,5 \cdot C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}. \quad (12)$$

Как видно, на первом проходе круга уточнение больше, чем на всех последующих проходах. Следовательно, наиболее интенсивно исправляется начальная погрешность обработки $\Delta\Pi_1$ на первом проходе круга.

Заслуживает внимания тот факт, что глубина шлифования не входит в расчетные зависимости для определения величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе. Поэтому она может устанавливаться по самым разным законам с учетом того, что на каждом последующем проходе круга она должна превышать величину упругого перемещения, образующегося на предыдущем проходе круга.

Рассмотрим случай зубошлифования, когда обрабатываемая впадина зубчатого колеса имеет симметричный вид (рис. 2). Тогда, очевидно, справедливо:

$$\Delta\Pi_1 = \Pi_1 - \Pi_2 = (t_0 + A_0) - (t_0 - A_0) = 2 \cdot A_0, \quad (13)$$

где t_0 – глубина шлифования, м; Δ_0 – величина смещения оси конусного круга относительно оси впадины, м.

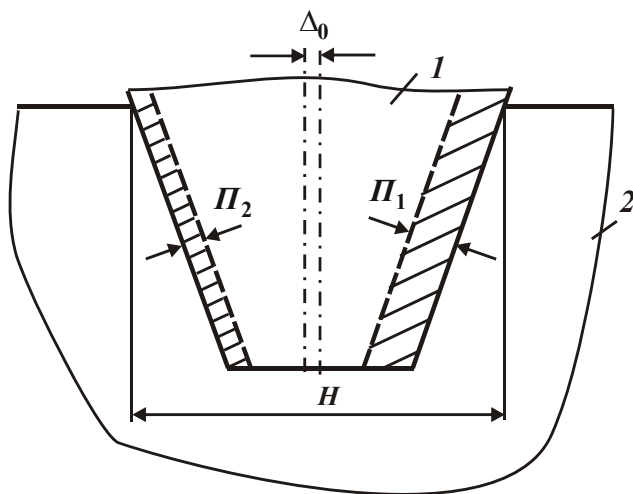


Рис. 2. Расчетная схема величины смещения оси конусного круга относительно оси впадины Δ_0 .

обработки симметричной по форме впадины, когда начальная погрешность определена лишь смещением оси конусного круга относительно оси впадины на величину Δ_0 . Тогда зависимости (4) – (8) с учетом (13) примут вид

$$y = \frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \Delta_0; \quad (14)$$

$$y_2 = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^2 \cdot \Delta_0; \quad (15)$$

$$y_3 = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^3 \cdot \Delta_0; \quad (16)$$

$$y_n = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^n \cdot \Delta_0. \quad (17)$$

Из приведенных зависимостей вытекает, что уточнение на каждом проходе круга одинаково и равно

$$\varepsilon = \frac{y}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots = \frac{y_{n-1}}{y_n} = \frac{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha}. \quad (18)$$

Соответственно суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$ равно

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\Delta_0}{y_n} = \left(\frac{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{2 \cdot \sigma \cdot V_{dem} \cdot B \cdot \cos \alpha} \right)^n. \quad (19)$$

В данном случае величины Δ_0 и y_n заданы, поэтому известным является и суммарное уточнение $\varepsilon_{сум} > 1$. Подставляя зависимость (18) в (19), имеем

Данный случай обработки может иметь место после операции зубонарезания, когда образуется достаточно точный профиль зубчатого колеса. После термической или химико-термической обработки вследствие термоупругих деформаций этот профиль может исказиться, что приведет к образованию погрешности обработки, обобщенно выражаемой параметром $\Delta\Pi_1$, который входит во все приведенные выше зависимости. Однако для упрощения расчетов и получения принципиальных решений можно ограничиться рассмотрением случая

$$\varepsilon_{\text{сум}} = \varepsilon^n. \quad (20)$$

Из зависимости (20) следует, что чем больше уточнение на проходе круга ε , тем за меньшее количество проходов круга n можно достичь заданного суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$. Необходимо отметить, что всегда $\varepsilon > 1$. При условии $\varepsilon \rightarrow 1$, исходя из зависимости (20), процесс исправления начальной погрешности обработки, определяемой суммарным уточнением $\varepsilon_{\text{сум}}$, неосуществим даже при условии $n \rightarrow \infty$. Поэтому с целью повышения интенсивности устранения начальной погрешности обработки необходимо уточнение на проходе круга ε увеличивать, а количество проходов круга n , наоборот, уменьшать. Исходя из этого может показаться, что наилучшим вариантом обработки с точки зрения снижения времени обработки является съём припуска за один проход с одновременным обеспечением заданной погрешности обработки y_n . Однако, в соответствии с зависимостью (17) это приведет к существенному уменьшению скорости детали $V_{\text{дет}}$, что в свою очередь вызовет снижение производительности обработки (увеличение основного времени обработки). В связи с этим, очевидно, должно существовать оптимальное количество проходов круга n , при котором основное время обработки принимает наименьшее значение при условии обеспечения заданной погрешности обработки y_n .

Основное время обработки τ в общем виде описывается зависимостью

$$\tau = \frac{n \cdot L}{V_{\text{дет}}}, \quad (21)$$

где L – длина обрабатываемого отверстия, м.

Разрешим зависимость (19) относительно скорости детали $V_{\text{дет}}$:

$$V_{\text{дет}} = \frac{C \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{2 \cdot \sigma \cdot B \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_{\text{сум}}}}. \quad (22)$$

Подставим зависимость (22) в (21):

$$\tau = \frac{2 \cdot n \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_{\text{сум}}} \cdot \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}. \quad (23)$$

Очевидно, с увеличением количества проходов круга n основное время обработки τ изменяется неоднозначно, т.к. с увеличением n множитель $\sqrt[n]{\varepsilon_{\text{сум}}}$ уменьшается. Следовательно, существует экстремум основного времени обработки τ от количества проходов круга n . Для его определения воспользуемся необходимым условием экстремума $\tau'_n = 0$:

$$\tau'_n = \frac{2 \cdot \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_{\text{сум}}} \cdot \left(1 - \frac{\ln \varepsilon_{\text{сум}}}{n} \right) = 0. \quad (24)$$

Разрешим уравнение (24) относительно количества проходов круга n :

$$n = \ln \varepsilon_{\text{сум}} \quad \text{или} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{\text{сум}} = e^n. \quad (26)$$

В итоге пришли к зависимости, аналогичной (20). Сравнивая зависимости (20) и (26), получено

$$\varepsilon = e. \quad (27)$$

Следовательно, в точке экстремума основного времени обработки τ уточнение на проходе круга ε равно числу $e \approx 2,72$.

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (25) значения суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$ для различного количества проходов круга n . Как видно, за 3–4 прохода круга можно обеспечить значительные величины суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$, что согласуется с практическими данными.

Таблица 1

Расчетные значения суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$

n	1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_{\text{сум}}$	2,72	7,4	20,1	54,7	148,9	405

С учетом отношения $\sqrt[n]{\varepsilon_{\text{сум}}} = e$ экстремальная скорость детали $V_{\text{дет}}$, определяемая зависимостью (22), выразится

$$V_{\text{дет}} = \frac{C \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{2 \cdot e \cdot \sigma \cdot B \cdot \cos \alpha}. \quad (28)$$

Реализуя на практике установленную таким образом скорость детали $V_{\text{дет}}$, можно обеспечить наименьшее значение основного времени обработки τ_{min} . Для доказательства того, что в точке экстремума основное время обработки принимает минимальное значение, определим вторую производную τ_n'' :

$$\tau_n'' = \frac{2 \cdot \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_{\text{сум}}} \cdot \frac{\ln^2 \varepsilon_{\text{сум}}}{n^3} > 0. \quad (29)$$

Как видно, в точке экстремума функции τ ее вторая производная всегда положительна. Поэтому имеет место минимум функции τ . Для определения минимального значения основного времени обработки τ_{min} подставим зависимости (25) и (26) в зависимость (23):

$$\tau = \frac{2 \cdot e \cdot \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}. \quad (30)$$

Из зависимости (30) вытекает, что чем больше суммарное уточнение $\varepsilon_{\text{сум}}$, тем больше τ_{min} . Основными условиями уменьшения минимального значения основного времени обработки τ_{min} следует рассматривать уменьшение отношения $\sigma / K_{\text{ш}}$ и увеличение параметров C и $V_{\text{кр}}$. Однако, увеличение скорости круга $V_{\text{кр}}$ ведет к увеличению температуры шлифования. Поэтому основным условием уменьшения τ_{min} является уменьшение отношения $\sigma / K_{\text{ш}}$ за счет повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне шлифования. Необходимо отметить, что в приведенные выше зависимости не входит такой параметр как высота круга H . Обеспечение заданной погрешно-

сти обработки y_n достигается в результате установления оптимального количества проходов круга n . Следовательно, при зубошлифовании по методу профильного копирования можно по разным законам задавать глубины шлифования, по сути, на каждом из проходов круга. Это не внесет изменений в закономерности формирования погрешностей обработки. В конечном итоге будет получена заданная величина y_n . Поскольку величины H и y_n не взаимосвязаны, то вполне возможно, что на первом проходе круга может быть удалена основная часть припуска, а последующих проходах – оставшаяся небольшая часть припуска. В этом случае на первом проходе круга с целью повышения производительности обработки, по сути, может быть реализована схема высокопроизводительного глубинного шлифования, а на последующих проходах – схема многопроходного шлифования со съемом небольших припусков, соизмеримых с величинами упругих перемещений, образуемых на предыдущих проходах круга. Однако, для обоснованного выбора оптимального варианта зубошлифования по методу профильного копирования необходимо располагать количественными значениями скорости детали, которые необходимо устанавливать на каждом проходе круга. Иными словами, необходимо знать характер изменения скорости детали по проходам круга с учетом неравномерности снимаемого припуска на каждом проходе круга.

Проведенная выше оптимизация параметров зубошлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности обрабатываемых поверхностей показала, что эффективно съем припуска производить за несколько проходов круга с одинаковой скоростью детали. В связи с этим произведем расчет скорости детали $V_{дет}$ по зависимости (28) для следующих исходных данных: $C=3 \cdot 10^3$ кГс/мм; $K_{ш}=0,4$; $V_{кр}=40$ м/с; $\sigma=10^4$ кГс/мм²; $B=20$ мм; $\alpha=30^0$. В результате выполненных расчетов установлено, что $V_{дет}=3,06$ м/мин. Как показывает практика применения технологии зубошлифования по методу профильного копирования, вследствие неточности установки шлифовального круга при наладке станка начальная погрешность обработки может принимать достаточно большие значения – $\Delta\Pi_1=0,1 \dots 0,5$ мм, т.е. на уровне снимаемого припуска – 0,4 мм на сторону. Учитывая то, что требуемая точность обработки составляет $y_n=0,005 \dots 0,01$ мм, суммарное уточнение равно $\varepsilon_{сум}=20 \dots 50$. Исходя из табл. 1, это предполагает осуществление 3–4-х проходов круга для обеспечения заданной точности обработки.

Если распределить снимаемый припуск равномерно по проходам круга, то окажется, что на первом проходе он составляет 0,1 мм и более. Очевидно, удалить такой большой припуск за один проход круга со скоростью детали $V_{дет}$ чрезвычайно сложно: на режущие зерна круга будут действовать значительные нагрузки, которые приведут к их интенсивному износу, образованию площадок и в конечном итоге к затуплению или засаливанию круга. Вследствие этого, круг будет работать в режиме интенсивного износа и быстрой потери режущей способности. Учитывая то, что в данном случае круг должен обладать высокой размерной стойкостью, чтобы не потерять свой профиль, такой вариант шлифо-

вания неэффективен. Поэтому необходимо уменьшать скорость детали $V_{дет}$. Несомненно, это приведет к снижению производительности обработки и повышению основного времени обработки, однако другого выхода нет.

В работе [4] показано, что уменьшение скорости детали $V_{дет}$ предполагает реализацию глубинного шлифования, когда весь припуск можно удалить за один проход круга с высокой производительностью обработки. При этом нагрузки, действующие на отдельные зерна круга, минимальны, что способствует снижению интенсивности износа круга. Следовательно, наиболее эффективным путем выхода из сложившейся ситуации является съем основной части припуска за один проход круга по схеме глубинного шлифования с небольшой скоростью детали. Оставшуюся часть припуска целесообразно удалить по схеме многопроходного шлифования с установленной выше скоростью детали $V_{дет} = 3$ м/мин за 3–4 прохода круга. Причем, на каждом проходе круга необходимо удалить припуск, сопоставимый с образующейся погрешностью обработки на первом проходе круга, который должен быть произведен по схеме глубинного шлифования. Произведем расчет величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе на первом проходе круга, по зависимости (4) для следующих исходных данных: $C = 3 \cdot 10^3$ кГс/мм; $K_{ин} = 0,4$; $V_{кр} = 40$ м/с; $\sigma = 10^4$ кГс/мм²; $B = 20$ мм; $\alpha = 30^0$; $V_{дет} = 1,5$ м/мин.

Как установлено расчетами, величина упругого перемещения $y = 45$ мкм. С учетом того, что в процессе зубошлифования необходимо обеспечить погрешность обработки, равную 5 мкм, суммарное уточнение должно быть равно $\varepsilon_{сум} = 9$. Исходя из табл. 1, для реализации данного суммарного уточнения необходимо обработку производить за 3–4 прохода круга. Например, для $n = 3$ на каждом проходе круга необходимо удалить припуск величиной 0,01 мм. Следовательно, на первом предварительном проходе круга необходимо удалить припуск, равный $0,4 - 0,03 = 0,37$ мм, а на трех последующих окончательных проходах – по 0,01 мм.

Таким образом установлено, что съем припуска на операции зубошлифования по методу профильного копирования целесообразно произвести за несколько проходов круга. Вначале следует осуществить предварительное шлифование по схеме однопроходного глубинного шлифования со съемом основной части припуска – 0,37 мм, а затем – окончательное шлифование по схеме многопроходного шлифования (за 3 прохода круга) со съемом припуска на проходе, равном 0,01 мм. Такой маршрут обработки при зубошлифовании позволит обеспечить максимально возможную производительность обработки с учетом заданной точности обрабатываемой поверхности.

Список литературы: 1. Кашук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кашук, А.Б. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с. 2. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с. 3. Иванов И.Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / И.Е. Иванов. – Мариу-

поль, 2008. – 21 с. **4.** Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. **5.** Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков.– М.: Машиностроение, 2007. – 688с.