

ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ ПЛОСКОМ ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА

А.А. Дианов, Е.Ю. Татаркин, В.А. Терентьев

В статье рассмотрено образование волнистости на обрабатываемой поверхности детали при плоском шлифовании прерывистыми кругами по причине колебаний круга и из-за прерывистости процесса формообразования. С помощью математической модели определены и соотнесены между собой высоты волн, образующихся по приведенным причинам.

This article describes the wave formation on workpiece surface, during peripheral flat grinding by interrupted abrasive discs, because of the disc's vibration and the intermittence of the shaping process. Wave's heights, which are formed by these reasons, were determined and correlated with each other by means of mathematical model.

Появление волнистости на обрабатываемой поверхности обусловлено различными причинами. В момент формирования профиля при обработке поверхности меняется фактическая глубина резания $\tau_{\phi i}(\varphi, x)$, которую можно представить как сумму средних и гармонических величин [1]:

$$\tau_{\phi i}(\varphi, x) = \overline{\tau_{\phi i}}(x) + \tau_{\phi \omega i}(\varphi, x), \quad (1)$$

где $\overline{\tau_{\phi i}}(x)$ и $\tau_{\phi \omega i}(\varphi, x)$ – средняя и колебательная составляющие.

Волнистость обрабатываемой поверхности можно снизить реализацией цикла шлифования, при котором значительно снижают скорость детали (v_d) в период выхаживания, при этом высота волнистости уменьшается за счёт обеспечения эффекта самоперерезания волн [2]. Недостатком циклов шлифования со снижением (v_d) является возможное появление прижога поверхности при некоторых значениях (v_d).

Вероятность появления прожога уменьшается при использовании шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью. По данным [3] в зависимости от условий и режимов обработки уменьшение тепла, поступающего в деталь при прерывистом шлифовании, может изменяться от 20 до 40 %, что практически исключает возможность образования прижога. Но при плоском шлифовании прерывистой периферией круга возникает ещё один источник образования волнистости – это прерывистость процесса формообразования.

При плоском шлифовании прерывистой периферией круга, пока передняя кромка выступа, вращаясь вокруг оси шлифовального круга с радиусом R вступит в работу, деталь

успеет пройти некоторое расстояние. В результате на поверхности детали образуются волны высотой равной

$$H = R \left(1 - \cos \left(\frac{s}{2R} \right) \right), \quad (2)$$

где R – радиус шлифовального круга, м; s – расстояние, которое пройдёт деталь с момента окончания резания задней кромкой n -ого выступа и началом резания $n+1$ -ого выступа (своего рода подача на впадину).

В связи с этим в этой статье ставится задача – создание и обоснование математической модели, описывающей профиль обрабатываемой поверхности с учётом колебаний шлифовального круга, вызванных погрешностью его установки на станке и с учётом прерывистости процесса формообразования.

Предлагаемая математическая модель позволяет определить траекторию образующей обрабатываемой поверхности и построить среднюю линию. В последствии, опираясь на зависимости, приведённые в [1], представляется возможным от полученного профиля отсчитывать отклонения, вызванные рядом случайных и периодических факторов, таких как отклонение профиля круга, его износ, изменение размеров круга и обрабатываемой поверхности из-за теплового воздействия, и другими.

В [2] приводится схема образования волнистой поверхности (рисунок 1). Через R здесь обозначен радиус шлифовального круга.

Заданной траекторией движения шлифовального круга при плоском шлифовании является прямая 1', а требуемой поверхностью детали после обработки прямая 2'. Действительной траекторией инструмента вслед-

ствии вибросмещений является кривая 1. При этом условно принимается, что колеблется только инструмент.

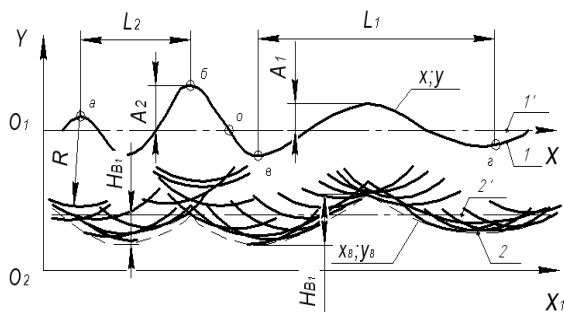


Рисунок 1 – Схема образования волнистой поверхности

Образуется волнистая поверхность 2, как огибающая семейства дуг радиусом R, центры которых находятся на кривой 1. Рассмотрим участки траектории а – б и в – г, где максимальная амплитуда A₂ примерно вдвое больше, чем максимальная амплитуда A₁. Период L₂ значительно меньше периода L₁, т. е. соблюдается соотношение L₁/A₁ >> L₂/A₂. Минимальные амплитуды колебаний на обоих участках примерно равны.

Из геометрического построения профиля волнистой поверхности следуют выводы: формы кривых волнистой поверхности и траектории перемещения инструмента существенно отличны; шаг волн, образующихся на поверхности детали, и период колебаний траекторий примерно равны, но волны траектории малой длины могут и не отражаться на волнистости; увеличение амплитуды относительных колебаний инструмента и детали ещё не означает увеличения высоты волн на детали, и видимо, справедливо неравенство H_в < 2A.

Найдём уравнение профиля волнистой поверхности без учёта деформации. Огибающая семейства окружностей

$$F(x, y, t) = 0, \quad (3)$$

где x, y – координаты движения инструмента относительно детали.

Продифференцировав уравнение (3) по параметру t

$$\frac{\partial F(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

и исключив параметр t из уравнений (3) и (4), получим уравнение дискриминантной линии. Искомая огибающая совпадает с ней или является частью её.

Уравнение семейства окружностей радиусом R имеет вид:

$$(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2 - R = 0. \quad (5)$$

Продифференцировав это уравнение по t и решив его совместно с уравнением (5), найдём координаты профиля волнистой поверхности:

$$\left. \begin{aligned} x_B &= x \pm \frac{R \dot{y}}{\sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2}}; \\ y_B &= y \pm \frac{R \dot{x}}{\sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где знаки – и + относятся ко второй мнимой огибающей.

Волнистость часто образуется вследствие установки шлифовального круга на станке с некоторой величиной эксцентриситета. В этом случае биение шлифовального круга относительно обрабатываемой детали происходит с амплитудой A₁ (гармоника первого порядка). Определим траекторию движения шлифовального круга, совершающего равномерное вращательное движение со скоростью v_к при плоском шлифовании. Деталь имеет равномерное поступательное движение со скоростью v_д. Центр шлифовального круга смещён от оси вращения на величину эксцентриситета E. В работе [2] показано, что при качении без скольжения полоиды радиусом r (точка 0 лежит вне полоиды) центр инструмента в относительном движении опишет удлинённую циклоиду-трохоиду (в системе координат YOX)

$$\left. \begin{aligned} x &= E \sin \varphi \pm B; \\ y &= E (1 - \cos \varphi), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где φ – угол поворота шлифовального круга; E – эксцентриситет, с которым установлен шлифовальный круг; B – коэффициент, определяемый выражением:

$$B = \frac{v_d R}{60 v_k}, \quad (8)$$

где v_{кп} – скорость вращения шлифовального круга, м/с; v_д – скорость перемещения детали, м/мин.

Подставив (7) и производную от них, по φ в уравнения (6) и произведя некоторые упрощения, получим координаты профиля волнистой поверхности:

ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ ПЛОСКОМ ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА

$$\left. \begin{aligned} x_B &= E \sin \varphi \pm B + \frac{R \sin \varphi}{\cos \varphi \pm B}; \\ y_B &= E(1 - \cos \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь при определённых R , $v_{кр}$ и E возможно появление петли и самоперерезание волн.

Приведённая математическая модель не учитывает образование волнистости из-за прерывистости процесса формообразования. Для учёта этого явления радиус прерывистого шлифовального круга R на участках впадин следует считать не постоянным, а изменяющимся в зависимости от угла поворота шлифовального круга. Обозначим радиус шлифовального круга $R(\varphi)$ и введём функцию $W(\varphi)$, определяющую высоту образования волны из-за прерывистости процесса и зависящую также от φ . В результате для одного прохода детали получим:

$$\left. \begin{aligned} x_B &= A_1 \sin \varphi + B \varphi + \frac{R(\varphi) \sin \varphi}{\cos \varphi + B}; \\ y_B &= A_1(1 - \cos \varphi) + W(\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где x_B и y_B – координаты профиля обработанной поверхности в системе координат XOY ; φ – угол поворота шлифовального круга; A_1 – амплитуда колебаний центра шлифовального круга относительно оси вращения, гармоника первого порядка.

В свою очередь $R(\varphi)$ можно описать выражением:

$$R(\varphi) = R - W(\varphi). \quad (11)$$

На тех участках, где формирование поверхности происходит выступами прерыви-

$$W(\varphi) = \begin{cases} 0, & \text{при } \varphi \in [n\alpha_{\text{выст}} + \alpha_{\text{впад}}; k\alpha_{\text{выст}} + \alpha_{\text{впад}}] \\ R \left(1 - \cos \left(\frac{s}{2R} \right) \right), & \text{при } \varphi \in (k\alpha_{\text{выст}} + \alpha_{\text{впад}}; k\alpha_{\text{выст}} + k\alpha_{\text{впад}}) \end{cases}, \quad (12)$$

где s – расстояние, которое пройдёт деталь с момента окончания резания задней кромкой n -ого выступа и началом резания $n+1$ -ого выступа (подача на впадину), m ; $\alpha_{\text{выст}}$ – угол сектора прерывистого шлифовального круга, занимаемого выступом; $\alpha_{\text{впад}}$ – угол сектора прерывистого шлифовального круга, занимаемого впадиной; n – количество впадин шлифовального круга, которые прошли зону резания на текущем обороте; k – количество выступов шлифовального круга, которые прошли зону резания на текущем обороте (рисунок 3).

стого шлифовального круга, профиль обрабатываемой поверхности ничем не отличается от профиля, получаемого сплошным шлифовальным кругом, а на участках, где формирование поверхности происходит под впадиной шлифовального круга, наблюдается некоторое отклонение от профиля поверхности, описываемого (9) и вызванное прерывистостью процесса (рисунок 2).

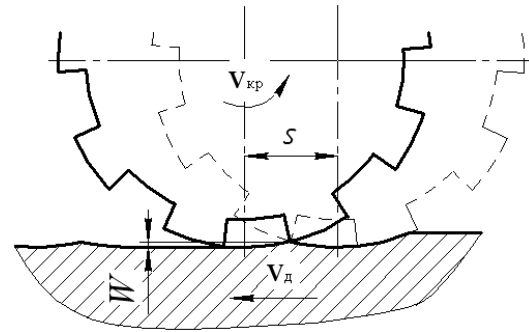


Рисунок 2 – Схема образования волн по причине прерывистости процесса формообразования: s – расстояние, которое пройдёт деталь с момента окончания резания задней кромкой n -ого выступа и началом резания $n+1$ -ого выступа; v_d – скорость движения детали; $v_{кр}$ – скорость вращения круга; W – высота образующихся волн

В связи с этим кривую профиля обрабатываемой поверхности при прерывистом шлифовании можно описать с использованием кусочно-непрерывной функцией. В выражении (10) таковой является функция $W(\varphi)$:

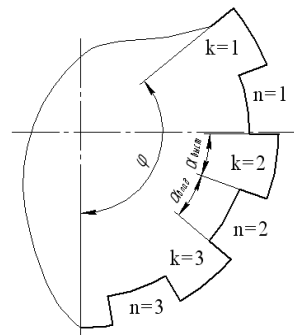


Рисунок 3 – Схема выступов и впадин шлифовального круга

Например, если $\varphi = \alpha_{\text{выст}}$, то $k=1$, ($n=0$)

$$\varphi = \alpha_{\text{выст}} + \alpha_{\text{выст}}, \text{ то } n = 1, (k = 1)$$

$$\varphi = 2\alpha_{\text{выст}} + \alpha_{\text{выст}}, \text{ то } k = 2, (n = 1)$$

$$\varphi = 2\alpha_{\text{выст}} + 2\alpha_{\text{выст}}, \text{ то } n = 2, (k = 2)$$

...

$$\varphi = k\alpha_{\text{выст}} + n\alpha_{\text{выст}}, \text{ то } k = k, (n = n).$$

Расстояние, которое пройдёт деталь с момента окончания резания задней кромкой n -ого выступа и началом резания $n+1$ -ого выступа, можно определить следующим образом:

$$s = t_{\text{впад}} v_d, \quad (13)$$

$$t_{\text{впад}} = \begin{cases} \frac{\varphi - (k\alpha_{\text{выст}} + n\alpha_{\text{впад}}) \cdot R_0(x)}{v_{\text{кр}} + v_d}, & \text{при } \varphi \in \left(k\alpha_{\text{выст}} + n\alpha_{\text{впад}}; k\alpha_{\text{выст}} + k\left(\frac{\alpha_{\text{впад}}}{2}\right) \right); \\ \frac{\alpha_{\text{впад}} - (\varphi - (k\alpha_{\text{выст}} + n\alpha_{\text{выст}})) \cdot R_0(x)}{v_{\text{кр}} + v_d} & \text{при } \varphi \in \left(k\alpha_{\text{выст}} + k\left(\frac{\alpha_{\text{впад}}}{2}\right); k\alpha_{\text{выст}} + k\alpha_{\text{впад}} \right), \end{cases} \quad (14)$$

где $R_0(x)$ – текущий радиус-вектор шлифовального круга с учётом износа.

Выражение (10) определяет координаты профиля волнистой поверхности для одного прохода. Для многопроходной обработки можно предложить следующую последовательность определения координат профиля обрабатываемой поверхности:

Как только x_B достигает значения

$$x_B = L_{\text{врез}} + L_{\text{дет}} + L_{\text{вых}}, \quad (15)$$

где $L_{\text{врез}}$ – длина врезания шлифовального круга, м; $L_{\text{дет}}$ – длина обрабатываемой поверхности детали, м; $L_{\text{вых}}$ – длина выхода шлифовального круга, м; знак в выражении (8) меняется на противоположный, а x_B на обратном проходе находится по выражению:

$$x_B = L_{\text{врез}} + L_{\text{дет}} + L_{\text{вых}} + A_1 \sin \varphi - B(\varphi) + \frac{R(\varphi) \sin \varphi}{\cos \varphi - B}. \quad (16)$$

Если осуществляется подача на проход, то y_B определяется по выражению:

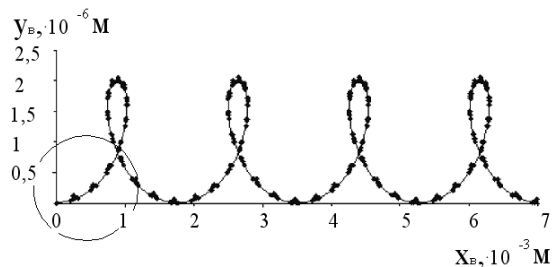
$$y_B = E(1 - \cos \varphi) - s_{\text{проход}}, \quad (17)$$

где $s_{\text{проход}}$ – подача на проход, мм.

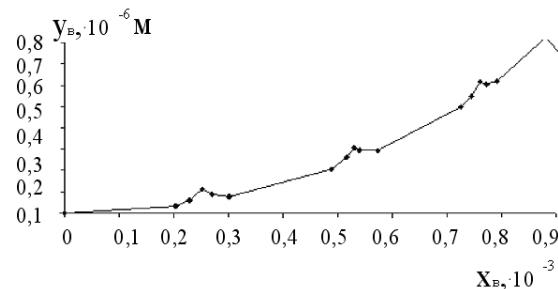
При определении по (10) координат профиля обработанной поверхности так же как и по (9), возможно появление петли и самоперерезание профиля волн. Например, на рисунке 4 (а) приведен отдельный участок поверхности профиля обработанной прерывистым шлифовальным кругом диаметром 220 мм; скорость вращения круга $v_{\text{кр}}=35$ м/с; скорость перемещения детали $v_d=5$ м/мин;

где $t_{\text{впад}}$ – время с момента окончания резания задней кромкой n -ого выступа и началом резания передней кромкой $n+1$ -ого выступа, время прохождения впадины, мин. Это время зависит от угла сектора прерывистого круга, занимаемого впадиной. Условно можно считать, что максимальная высота волны, создаваемой от прохождения впадины над зоной резания приходится на момент прохождения середины впадины, тогда кривые профиля участков слева и справа от этой точки будут пропорциональны текущему значению угла φ поворота круга за вычетом углов пройденных выступов и впадин. В связи с этим время $t_{\text{впад}}$ может быть представлено кусочнонепрерывной функцией:

число режущих выступов $n=16$, протяжённость выступа $l_1=32$ мм; протяжённость впадины $l_2=16$ мм, эксцентриситет $E=0,001$ мм.



а



б

Рисунок 4 – Профиль участка волнистой поверхности: а – эффект самоперерезание волн; б – волны на обработанной поверхности, вызванные прерывистостью процесса формообразования

Как видно из рисунка 4 (а) на поверхности из-за биения шлифовального круга, закреплённого относительно оси вращения с эксцентриситетом E , образуются волны высоко-

ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ ПЛОСКОМ ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА

той, зависящей от величины петли самоперезарезания, также из рисунка 4 (б) видно, что на эти волны накладываются более мелкие волны, зависящие от длины впадины скорости вращения прерывистого шлифовального круга и скорости движения детали.

Высота волн, образующихся от прерывистости процесса формообразования, для приведённого примера незначительна, её высота составляет 0,06 мкм, в то время как высота волн, образованных от биения шлифовального круга, закреплённого относительно оси вращения с эксцентриситетом E , составляет 1 мкм, всё же для прерывистых шлифовальных кругов с большими диаметрами и длинами впадин, высоты этих двух видов волн могут быть соизмеримы. В любом случае волнистость, образованная от прерывистости процесса плоского шлифования периферией круга, имеющей выступы и впадины, опасна, как вторичный источник возбуждения колебаний.

Кроме того, размер впадины в общем случае нельзя считать постоянным, по мере износа шлифовального круга этот размер увеличивается так, как это показано на рисунке 5. На выступах образуются рабочие поверхности, имеющие некоторый угол β наклон к плоскости резания (рисунок 5).

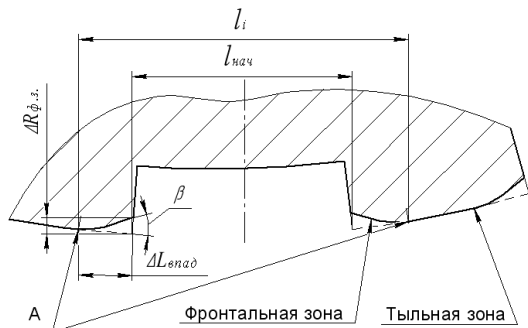


Рисунок 5 – Увеличение размера впадины по мере износа выступов прерывистого шлифовального круга: А – точка раздела фронтальной и тыльной зоны; $l_{нач}$ – длина впадины после правки круга; l_i – текущая длина впадины после образования фронтальной зоны

Если посмотреть на профиль выступа (торец круга), можно заметить, что часть его имеет спиральное очертание, часть – цилиндрическое. Точка раздела этих зон с течением времени шлифования перемещается от начала выступа к его концу. Условно назовём профиль до точки раздела фронтальной зоной, после точки раздела – тыльной. Рабочие выступы приобретают установившуюся форму после некоторого времени приработки кру-

га. С этого периода условия резания прерывистыми кругами сохраняются длительное время стабильными. Самозатачиваемость круга протекает равномерно по всему профилю с сохранением постоянного угла наклона фронтальной зоны [3].

Так как в процессе шлифования изменяется размер впадины, изменяется и время её прохождения относительно обрабатываемой поверхности, $t_{впад}$, что влияет на высоту волнистости, образующейся от прерывистости процесса формообразования. По данным [3] после 40-минутного шлифования твёрдого сплава ВК8 алмазным кругом АСП 125/100МС6 – 50% на выступах шлифовального круга сформировались фронтальные зоны, длина которых не превышает 0,2 – 0,25 длины режущего выступа.

Процесс самозатачиваемости выступов прерывистого шлифовального круга трудно поддаётся теоретическому описанию, и для его учёта необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

Приняв допущение о том, что угол β наклона фронтальной зоны в течение всего периода стойкости круга остаётся постоянным, при прочих равных условиях, представляется возможным рассчитать увеличение длины впадины в результате образования фронтальной зоны на выступах (рисунок 5):

$$\Delta L_{впад} = \frac{\Delta R_{ф.з.}}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (18)$$

где $\Delta R_{ф.з.}$ – уменьшение радиус-вектора прерывистого шлифовального круга в результате образования фронтальной зоны на выступах; β – угол наклона фронтальной зоны.

Реализация приведённой математической модели образования волнистости на детали при плоском прерывистом шлифовании периферией круга в виде программы для ЭВМ позволяет прогнозировать параметры волнистости, образующейся при шлифовании, что может быть применено при составлении технологических циклов плоского прерывистого шлифования периферией круга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новоселов, Ю. К. Обеспечение точности деталей при шлифовании / Ю.К. Новоселов, Е.Ю. Татаркин. – Саратов: Изд-во Саратов.ун-та, 1988. – 128 с.
2. Прилуцкий, В. А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей / В.А. Прилуцкий. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.
3. Якимов, А. В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.