

# Технология и технологические машины

УДК 621.92-5

## Исследование неравномерного абразивного воздействия при наружном круглом шлифовании

**С.А. Багиров**

*Установлены закономерности изменения количества фактически работающих абразивных зерен по длине рабочего хода в зависимости от текущего значения продольной координаты. Анализ полученной системы уравнений показывает, что количество фактически работающих абразивных зерен зависит от элементов режима резания, характеристик шлифовального круга и условий выполнения шлифовальной операции. Причем характер изменения на каждом из рассмотренных технологических примитивах различен. Величина перебега является одним из активных параметров механизма формирования неравномерного абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность.*

**Ключевые слова:** круглое шлифование, технологические примитивы, абразивные зерна, геометрические параметры, качество поверхности.

*The laws of changing a quantity of actually working abrasive grains along the length of a working course depending on a current value of the longitudinal coordinate are established. The analysis of the obtained system of the equations shows that the quantity of actually working abrasive grains depends on elements of a mode of cutting, characteristics of a grinding circle and conditions of a grinding operation performance. And the character of change on each of the considered technological primitive things is distinguished. The rerun size is one of the active parameters of the mechanism of formation of non-uniform abrasive effect on a processed surface.*

**Keywords:** round grinding, technological primitive things, abrasive grains, geometrical parameters, quality of a surface.



**Багиров  
Сахиб Абас оглы**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические комплексы и специальная техника» (Азербайджанский технический университет)

Завершающими стадиями процессов, происходящих в технологической системе, которые связаны с формированием геометрических параметров обрабатываемой поверхности и физико-механических свойств поверхностного слоя, являются процессы, протекающие в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Процессы, происходящие в технологической системе, в той или иной степени связаны со сложными физическими явлениями и активными химическими взаимодействиями материалов инструмента и детали в зоне контакта. Условия контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в основном характеризуются площадью контакта и ее параметрами на протяжении всего технологического перехода. При шлифовании площадь контакта формируется в результате контакта двух нерегулярных профилей инструмента и обрабатываемой поверхности. Параметры площади контакта формируются в зависимости от отклонений замыкающих звеньев линейных и пространственных размерных цепей, связывающих шлифовальный круг с обрабатываемой деталью. Эти отклонения в совокупности определяют пространственный характер зоны контакта. Следует отметить, что при различных методах шлифования характер нерегулярности зон контакта существенно отличается друг от друга как по частоте колебаний, так и по закономерности их распределения. Например, если при шлифовании методом врезания распределение плотности нерегулярных воздействий по высоте круга характеризуется законом нормального распределения, то при шлифовании на проход оно подчиняется закону эксцентриситета. При шлифовании на проход смещение центра плотности в сторону фронтальной части площади контакта объясняется высокой режущей способностью этой полосы.

В связи с изменением размеров, пространственного положения и интенсивности резания в площади контакта при каждом новом обороте детали в пределах технологических примитивов входа и выхода изменяются показатели качества и эффективность операции шлифования. Из изложенного выше следует, что наиболее характерным показателем зоны контакта

является вероятное количество фактически работающих абразивных зерен и закономерность их распределения по площади контакта. Интенсивность съема металла, величина силы резания, степень температурного воздействия на обрабатываемую поверхность и т. д. в совокупности определяются вероятным количеством фактически работающих абразивных зерен. Поэтому определение вероятного количества фактически работающих абразивных зерен и закономерности его изменения на протяжении всего технологического перехода в пределах отдельных технологических примитивов, является важной и актуальной задачей при исследовании механизма образования шлифованных поверхностей, в том числе и при наружном круглом шлифовании.

Одной из особенностей круглого шлифования является то, что для устранения ударного воздействия при входе и выходе шлифовального круга в контакт с обрабатываемой поверхностью и уменьшения протяженности технологических примитивов входа и выхода в концах прохода предусматриваются перебеги в размере

$$l_1 = l_r = 0,3H,$$

где  $H$  — высота круга [1].

Однако в настоящее время в научно-технической литературе предложенная величина перебега шлифовального круга при наружном круглом шлифовании ни теоретически, ни экспериментально не нашла должного обоснования. При этом следует отметить, что нахождение определенной части рабочей поверхности шлифовального круга в перманентном контакте с обрабатываемой поверхностью имеет как положительные, так и отрицательные моменты и требует более детального изучения с учетом специфических особенностей каждой операции в отдельности.

При наружном круглом шлифовании, как и при других методах шлифования с продольной подачей резание в основном производится зернами, расположенными на фронтальном участке рабочей поверхности круга, определенной величиной продольной подачи. Прорезанный участок в последующих оборотах детали повторно встречается с рабочей поверхностью

круга. При каждой повторной встрече прорезанного участка с рабочей поверхностью круга, часть зерен попадает в срезанные канавки, что приводит к их неравномерному нагружению по рабочей поверхности круга. Это явление приводит к неравномерному абразивному воздействию на протяжении всего контакта с обрабатываемой поверхностью. Кроме того в зонах входа шлифовального круга в контакт и выхода из него изменяется площадь контакта, о чем свидетельствуют погрешности формы в поперечном и продольном направлениях.

Наличие перманентного контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью приводит к повышенному температурному воздействию во время изменения направления продольной подачи в результате чего появляются прижоги, микротрещины и остаточные напряжения, способствующие снижению физико-механических свойств поверхностного слоя на соответствующих участках обработанной поверхности.

Проанализируем более детально отдельные характерные моменты круглого шлифования с исходной площадью контакта. При круглом шлифовании число условных полос на поверхности шлифовального круга определяется соотношением высоты круга  $H$  к продольной подаче  $S_d$ :  $H/S_d$ . Следует отметить, что в научно-технической и справочной литературе в качестве продольной подачи в основном указывается минутная подача. Однако, как следует из указанных выше суждений по отношению неравномерного абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность определяющее значение имеет подача на оборот детали. В технологических примитивах входа и выхода каждая полоса с шириной продольной подачи на оборот детали в порядке нахождения от зоны резания имеет повторные встречи с обрабатываемой поверхностью. При этом первая полоса в направлении продольной подачи является фронтальной и выполняет режущую функцию, а последующие полосы — выхаживающие.

Для аналитического описания неравномерного абразивного воздействия в зоне контакта целесообразно установить связь между про-

дольными подачами на оборот круга и на оборот детали. При этом в аналитическое выражение продольной подачи включают характеристики как основных, так и вспомогательных движений механизма формирования поверхности.

Продольную подачу на оборот детали выразим следующей формулой:

$$S_d = \frac{60V_k V_d}{V_d n_k D}, \quad (1)$$

где  $V$  — скорость продольного перемещения детали, м/мин;  $V_k$  — скорость вращения шлифовального круга, м/с;  $V_d$  — скорость вращения детали, об/мин;  $n_k$  — частота вращения круга, об/мин;  $D$  — диаметр шлифовального круга, мм.

Количество фактически работающих абразивных зерен во фронтальной полосе рабочей поверхности шлифовального круга определяется по формуле

$$i_{\text{факт}} = \pi D S_d i. \quad (2)$$

Здесь  $i_{\text{факт}}$  — количество фактически работающих абразивных зерен круга на площади  $1 \text{ мм}^2$ ;  $S_d$  — продольная подача на оборот детали, мм/об.

В работе [2] с достаточной для практики точностью и с учетом параметров кривой распределения предложена формула для определения количества активных зерен на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности круга:

$$i = \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4} \sqrt{\text{tg}\gamma \bar{X}_j^2 \sqrt{1-\varepsilon}}} \sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}, \quad (3)$$

где  $\beta$  — поправка на симметрическое расположение кривой распределения вылетов вершин зерен в рабочем слое круга ([2], с. 113);  $K$  — концентрация, %;  $\alpha$  — коэффициент формы зерна;  $\gamma$  — половина средневероятного значения угла режущей вершины зерна;  $\bar{X}$  — среднее значение размера зерен шлиф порошка ([2], табл. 1.17);  $\varepsilon$  — относительная критическая глубина заделки зерен ([2], табл. 2.43);  $\omega$  — удельная производительность, мм/с;  $V_k$  — скорость шлифовального круга, м/с;  $D$  — диаметр шлифовального круга, мм.

Подставив значения  $S_d$  и  $i$  из формулы (3) в формулу (2), получим количество фактически работающих абразивных зерен во фронтальной полосе рабочей поверхности шлифовального круга:

$$i = \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2\sqrt{1-\varepsilon}}} \sqrt{\frac{\omega}{1000V_k} \frac{\pi 60V_k Vd}{V_d n_k}}. \quad (4)$$

Длина рабочего хода при круглом наружном шлифовании цилиндрических поверхностей по схеме с исходным контактом состоит из следующих участков (рис. 1):

$$L_p = l_{\text{вх}_1} + l_{\text{вх}_2} + l_{\text{уст}} + l_{\text{вых}}, \quad (5)$$

где  $l_{\text{вх}_1} = a$ ;  $l_{\text{вх}_2} = H - a$ ;  $l_{\text{уст}} = L - 2H + a$ ;  $l_{\text{вых}} = a$ , т.е.  $L_p = L - (H + 2a)$ . Здесь  $l_{\text{вх}}$ ,  $l_{\text{вых}}$ ,  $l_{\text{уст}}$  — протяженности, соответственно технологических примитивов входа, выхода и установившегося шлифования, мм;  $L$  — длина обрабатываемой поверхности, мм;  $H$  — высота шлифовального круга, мм;  $H - a$  — длина исходной площади контакта, мм.

Для определения границ каждого участка нарушения установившегося процесса шлифования расположим схему шлифования в прямоугольной системе координат с указанием ха-

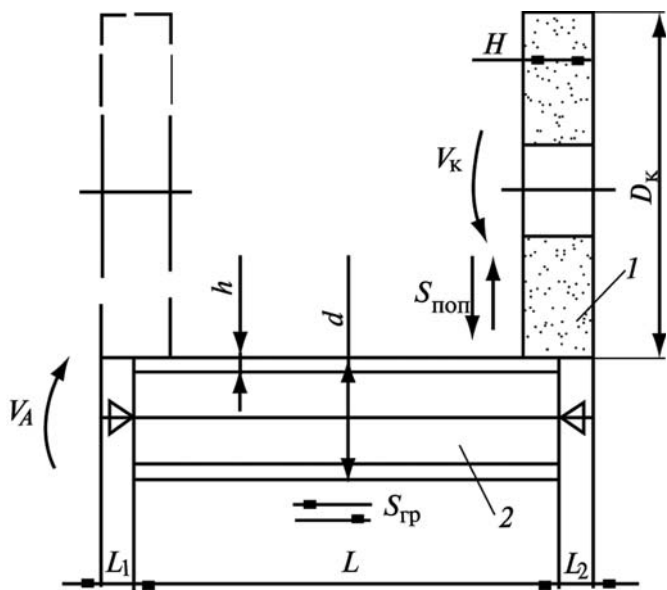


Рис. 1. Схема изменения количества фактически работающих абразивных зерен в технологических примитивах

рактерных продольных перемещений шлифовального круга от начала координат. Эту координатную систему назовем базовой, поскольку она определяет относительное положение обрабатываемой поверхности и шлифовального круга в зависимости от продольной подачи.

Первый условный участок рабочего хода соответствует исходной площади контакта (рис. 2, а). Второй участок характеризуется полным входом шлифованного круга в контакт с обрабатываемой поверхностью (рис. 2, б). При этом площадь контакта увеличивается от площади исходного контакта до площади контакта по всей высоте круга. Характерным для этого участка является то, что закономерности изменения количества фактически работающих зерен в зоне исходного контакта и в зоне входа отличаются. Закономерность этого изменения описывается формулой

$$i_f = \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2\sqrt{1-\varepsilon}}} \sqrt{\frac{\omega}{1000V_k} \frac{\pi 60V_k Vd}{V_d n_k}} \times \left[ \frac{(1-q)^{\frac{x_i n_d}{u}}}{1-q} + q^{\frac{x_i n_d}{u}} \left( \frac{n_d (H-a)}{u} \right) \right] \quad (0 \leq x_i \leq a). \quad (6)$$

На третьем участке рабочего хода шлифовальный круг отходит от участка исходного контакта и процесс переходит на стадию установления (рис. 2, в). Количество фактически работающих зерен на этом участке определяется по формуле

$$i_{f_{\text{вх}_2}} = \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2\sqrt{1-\varepsilon}}} \sqrt{\frac{\omega}{1000V_k} \frac{\pi 60V_k Vd}{V_d n_k}} \times \left[ \frac{(1-q)^{\frac{x_i n_d}{u}}}{1-q} + q^{\frac{x_i n_d}{u}} \left( \frac{H n_d - x_i n_d}{u} \right) \right] \quad (a \leq x_i \leq H). \quad (7)$$

На четвертом участке процесс стабилизируется, т. е. количество фактически работающих зерен становится стабильным (рис. 2, г) и рассчитывается по следующей формуле:

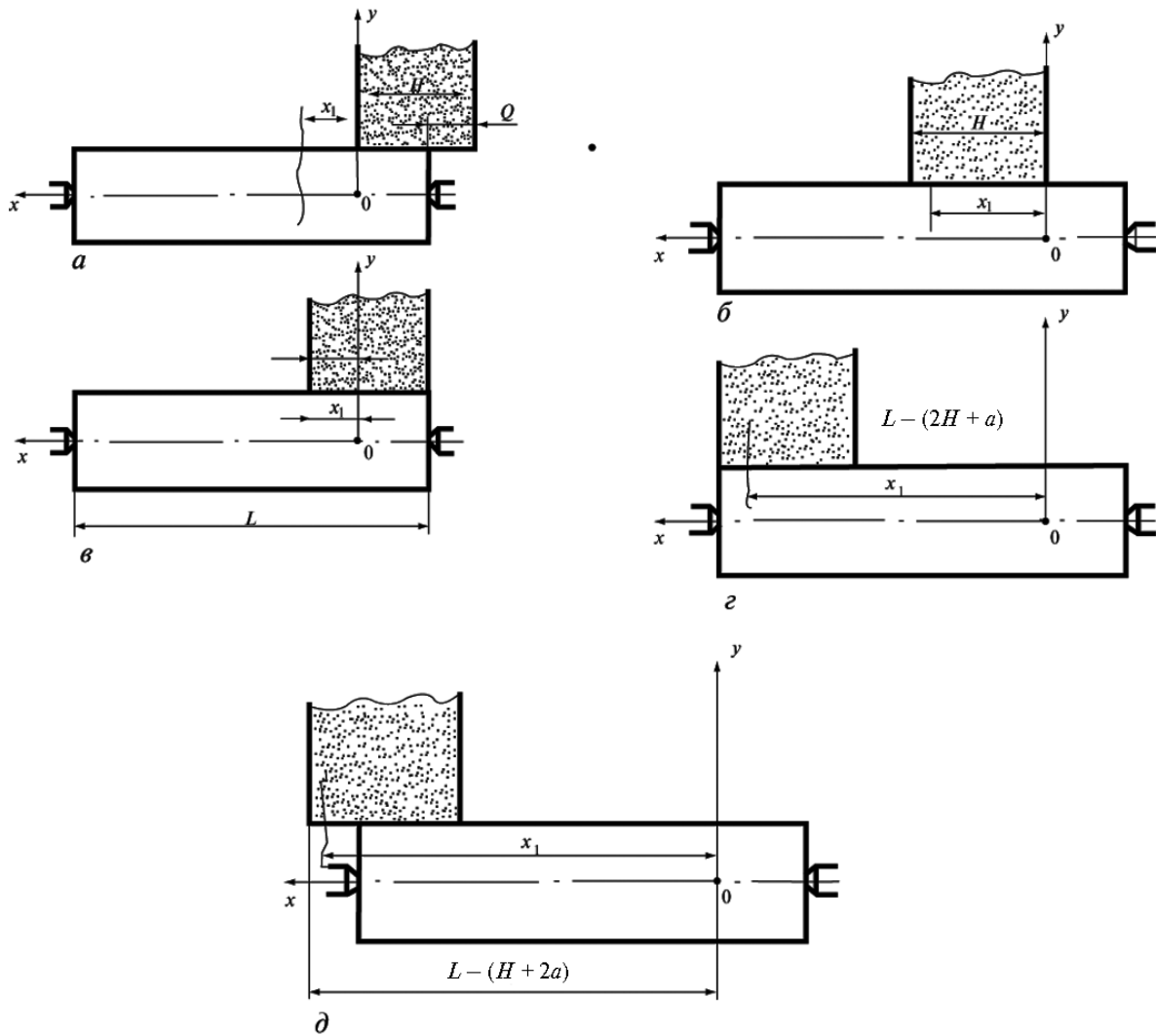


Рис. 2. Участки неравномерного абразивного воздействия при круглом шлифовании на проход:

*a* – участок с исходным контактом; *б* – полный вход шлифовального круга в контакт с обрабатываемой поверхностью; *в* – шлифовальный круг отходит от участка исходного контакта и процесс переходит на стадию установления; *г* – участок установившегося шлифования; *д* – нарушение установившегося процесса с частичным выходом шлифовального круга из контакта

$$i_{f_{\text{уст}}} = \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2\sqrt{1-\varepsilon}}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}\frac{\pi 60V_k Vd}{V_d n_k}} \times \left[ \frac{(1-q)^{\frac{Hn_d}{u}}}{1-q} \right] \quad (H < x_i \leq L - H - a). \quad (8)$$

$$i_{f_{\text{вых}}} = \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2\sqrt{1-\varepsilon}}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}} \times \frac{\pi 60V_k Vd q^{\frac{(x_i-L+a)n_d}{u}}}{V_d n_k (1-q)} \left[ 1 - q^{\frac{(H-x_i+L-a)n_d}{u}} \right] \quad (L + (a - H) \leq x_i \leq L - (H + 2a)). \quad (9)$$

На пятом участке происходит нарушение установившегося процесса с частичным выходом шлифовального круга из контакта (рис. 2, д). Перебег шлифовального круга прекращается тогда, когда поверхность контакта получает исходную величину:

Таким образом, закономерности изменения количества фактически работающих абразивных зерен по длине рабочего хода при шлифовании по схеме с исходным контактом описываются следующей системой уравнений:

$$i_{\phi} = \begin{cases} \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2}\sqrt{1-\varepsilon}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}\frac{\pi 60V_k Vd}{V_d n_k} \times \\ \times \left[ \frac{1-q^{\frac{x_i n_d}{u}}}{1-q} + q^{\frac{x_i n_d}{u}} \left( \frac{n_d(H-a)}{u} \right) \right] \\ (0 \leq x_i \leq a); \\ \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2}\sqrt{1-\varepsilon}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}\frac{\pi 60V_k Vd}{V_d n_k} \times \\ \times \left[ \frac{1-q^{\frac{x_i n_d}{u}}}{1-q} + q^{\frac{x_i n_d}{u}} \left( \frac{Hn_d - x_i n_d}{u} \right) \right] \\ (a \leq x_i \leq H); \\ \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2}\sqrt{1-\varepsilon}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}\frac{\pi 60V_k Vd}{V_d n_k} \times \\ \times \left[ \frac{1-q^{\frac{Hn_d}{u}}}{1-q} \right] (H < x_i \leq L - H - a); \\ \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2}\sqrt{1-\varepsilon}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}\frac{\pi 60V_k Vd}{V_d n_k} \times \\ \times \frac{q^{\frac{(x_i-L+a)n_d}{u}}}{1-q} \left[ 1 - q^{\frac{(H-x_i+L-a)n_d}{u}} \right] \\ (L + a - H \leq x_i \leq L - H + 2a). \end{cases} \quad (10)$$

Текущее значение количества фактически работающих абразивных зерен в пределах площади контакта определим путем умножения текущего значения фактически работающих зерен на оборот детали на соотношение длины дуги контакта к длине окружности обрабатываемой цилиндрической поверхности:

$$i_k = i_{\phi} \frac{L_k}{\pi D}, \quad (11)$$

где  $L_k$  — длина дуги контакта зерна с обрабатываемой поверхностью [2], мм,

$$i_k = \frac{i_{\phi} \sqrt{1 \pm \frac{V}{60V_k}} + \left( \frac{V}{60V_k} \right)^2 \sqrt{\frac{Ddt}{D+d}}}{\pi D}. \quad (12)$$

Здесь  $t$  — глубина резания, мм.

Знак «+» принимается при вращении круга и детали в одном направлении, а знак «-» при вращении круга и детали в противоположных направлениях:

$$i_k = \begin{cases} \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2}\sqrt{1-\varepsilon}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}\frac{60V_k V}{V_d n_k} \times \\ \times \left[ \frac{1-q^{\frac{x_i nd}{u}}}{1-q} + q^{\frac{x_i nd}{u}} \left( \frac{nd(H-a)}{u} \right) \right] \times \\ \times \sqrt{\left( 1 \pm \frac{V_d}{60V_k} \right)^2 + \left( \frac{V}{60V_k} \right)^2} \sqrt{\frac{Ddt}{D+d}} \\ (0 \leq x_i \leq a); \\ \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2}\sqrt{1-\varepsilon}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}\frac{60V_k V}{V_d n_k} \times \\ \times \left[ \frac{1-q^{\frac{x_i nd}{u}}}{1-q} + q^{\frac{x_i nd}{u}} \left( \frac{Hnd - x_i nd}{u} \right) \right] \times \\ \times \sqrt{\left( 1 \pm \frac{V_d}{60V_k} \right)^2 + \left( \frac{U}{60V_k} \right)^2} \sqrt{\frac{Ddt}{D+d}} \\ (a \leq x_i \leq H); \\ \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2}\sqrt{1-\varepsilon}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}\frac{60V_k U}{V_d n_k} \times \\ \times \left[ \frac{1-q^{\frac{Hnd}{u}}}{1-q} \right] \sqrt{\left( 1 + \frac{V_d}{60V_k} \right)^2 + \left( \frac{V}{60V_k} \right)^2} \times \\ \times \sqrt{\frac{Ddt}{D+d}} (H < x_i \leq L - H - a); \\ \frac{0,167\beta\sqrt{K}}{\alpha^{3/4}\sqrt{\text{tg}\gamma\bar{X}_j^2}\sqrt{1-\varepsilon}}\sqrt{\frac{\omega}{1000V_k}}\frac{60V_k U}{V_d n_k} \times \\ \times \frac{q^{\frac{(x_i-L+a)d}{u}}}{1-q} \left( 1 - q^{\frac{(H-x_i+L-a)nd}{u}} \right) \times \\ \times \sqrt{\left( 1 \pm \frac{V_d}{60V_k} \right)^2 + \left( \frac{V}{60V_k} \right)^2} \times \\ \times \sqrt{\frac{Ddt}{D+d}} (L + a - H \leq x_i < L - H + 2a). \end{cases} \quad (13)$$

Установленные закономерности (13) свидетельствуют об изменении количества фактически работающих абразивных зерен по длине рабочего хода в зависимости от текущего значения продольной координаты  $X_r$ . Анализ системы уравнений показывает, что количество фактически работающих абразивных зерен зависит от элементов режима резания, характеристик шлифовального круга и условий выполнения шлифовальной операции. Причем характер изменения на каждом из рассмотренных технологических примитивах различен. Наибольшее влияние на изменение количества фактически работающих зерен оказывает величина продольной подачи на оборот детали. С увеличением продольной подачи и уменьшением скорости вращения детали в разумных пределах количество активных абразивных зерен увеличивается.

Величина перебега — один из активных параметров механизма формирования неравномерного абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность. С помощью величины исходного контакта можно:

- изменять длину рабочего хода, которая помимо повышения производительности процесса, способствует также повышению жесткости и точности статической настройки технологической системы;

- исключить ударное воздействие в зонах входа и выхода и, тем самым очаги вынужденных колебаний в указанных участках;

- обеспечить изменения количества фактически работающих зерен в зависимости от величины, определяемой исходной площадью контакта, что в некоторой степени способствует стабилизации процесса и тем самым повышению точности обработки.

### Литература

1. Абразивная и алмазная обработка материалов / Под ред. А.Н. Резникова. Справочник. М.: Машиностроение, 1977.
2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974.

Статья поступила 27.06.2011 г.