

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ГИДРОАППАРАТУРЫ

Постановка проблемы. При изготовлении высокоточных деталей гидроаппаратуры из труднообрабатываемых материалов постоянно возникают проблемы обеспечения высоких показателей шероховатости поверхности на операциях шлифования. Это связано с тем, что в условиях традиционно применяемой обработки свободным абразивом происходит шаржирование абразивных зерен в обрабатываемую поверхность. Поэтому с целью исключения данного явления и повышения качества обработки высокоточных деталей гидроаппаратуры, а также снижения трудоемкости обработки, рекомендуется вместо процессов обработки свободным абразивом применять процессы обработки инструментом со связанным абразивом (шлифование, хонингование и т.д.) или лезвийный инструмент. Естественно, это требует обеспечения при шлифовании таких же показателей шероховатости поверхности, как и при обработке свободным абразивом, что является трудноразрешимой задачей. В успешном решении этой задачи важная роль принадлежит совершенствованию технологий шлифования за счет применения новых характеристик абразивных кругов, обладающих высокой режущей способностью и одновременно обеспечивающих повышение чистоты обработки. Как показывает практика прецизионного шлифования, добиться высоких показателей шероховатости поверхности можно путем снижения разноразностного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга. Однако теоретических решений, позволяющих обосновать закономерности формирования шероховатости поверхности в этих условиях, фактически нет в научно-технической литературе. Поэтому задачу выбора оптимальных условий обработки и характеристик абразивных кругов по критерию наименьшей шероховатости поверхности на основе снижения разноразностного расположения зерен на рабочей поверхности круга следует считать актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблеме снижения шероховатости поверхности на операциях шлифования посвящены работы [1-3], разработан теоретико-вероятностный подход [4-6], позволяющий с высокой степенью точности описать сложные закономерности формирования шероховатости при шлифовании. Благодаря этим работам появилась возможность обоснованного выбора оптимальных режимов шлифования и характеристик круга с учетом ограничения по шероховатости обработки. Дальнейшим развитием теоретико-вероятностного подхода при шлифовании стали работы [7, 8], используя которые, можно решить задачу обоснования влияния разноразностного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга на шероховатость обработки и определить оптимальные условия шлифования по критерию наименьшей шероховатости обработки. В связи с этим, решение данной задачи требует проведения теоретических исследований закономерностей формирования шероховатости поверхности при шлифовании как с учетом, так и без учета разноразностного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга.

Цель работы – определение условий уменьшения шероховатости обработки при шлифовании и на их основе выбор оптимальных характеристик абразивных кругов применительно к операциям шлифования высокоточных деталей гидроаппаратуры.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи воспользуемся зависимостью, определяющей параметр шероховатости обрабатываемой поверхности R_{max} при врезном шлифовании прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга (рис. 1) [7]:

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{6,75 \cdot b \cdot V_{дет}}{k \cdot V_{кр}}}, \quad (1)$$

где b – максимальная высота выступающих режущих зерен над уровнем связки круга, м; k – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт./м²; $V_{дет}$, $V_{кр}$ – соответственно скорости детали и круга, м/с.

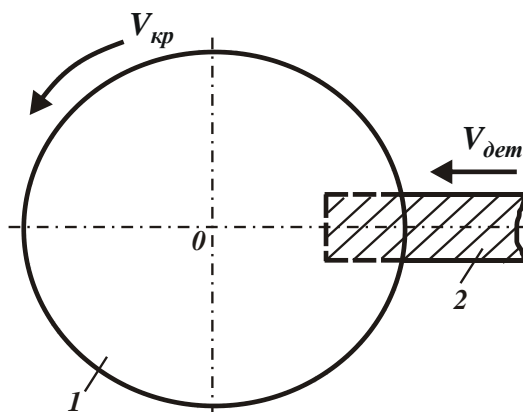


Рис. 1. Расчетная схема процесса шлифования: 1 – круг; 2 – деталь.

Параметры b и k для алмазного круга определяются известными зависимостями [3]:

$$b = \left(-\varepsilon \right) \bar{X}; \quad (2)$$

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot \left(-\varepsilon \right)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}, \quad (3)$$

где m – объемная концентрация зерен круга (для 100%-й концентрации алмазного круга – $m=100$); \bar{X} – зернистость круга, м; $\left(-\varepsilon \right)$ – безразмерная величина, определяющая степень выступающих режущих зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0...0,5.

Подставляя зависимости (2) и (3) в (1), получим:

$$R_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{450 \cdot \pi \cdot V_{дет}}{m \cdot V_{кр}}}. \quad (4)$$

Из зависимости (4) вытекает, что наибольшее влияние на параметр R_{max} оказывает зернистость круга \bar{X} . Поэтому добиться существенного уменьшения параметра R_{max} можно, прежде всего, за счет уменьшения зернистости круга \bar{X} . Уменьшить R_{max} можно увеличением m , $V_{кр}$ и уменьшением $V_{дет}$.

Зависимость (1) получена с учетом вероятностного участия зерен в резании и разновысотного расположения их на рабочей поверхности круга. Очевидно, при этом в резании будут участвовать лишь наиболее выступающие над уровнем связки зерна. Их количество относительно небольшое. Поэтому и шероховатость обработанной поверхности при шлифовании принимает, как правило, достаточно большие значения. Следовательно, уменьшение разновысотности расположения вершин зерен над уровнем связки круга и, соответственно, увеличение количества одновременно работающих зерен является важным фактором уменьшения шероховатости поверхности.

Добиться увеличения количества одновременно работающих зерен в процессе шлифования можно, как отмечалось выше, увеличением их объемной концентрации в круге m . Можно также использовать относительно мягкие связки круга, обеспечивающие «утопание» в них наиболее выступающих зерен под действием возникающих

при шлифовании нагрузок. В результате фактически все зерна, выступающие над уровнем связки круга, могут принимать участие в процессе резания, что приведет к уменьшению шероховатости поверхности. Чтобы количественно оценить влияние «утопания» зерен в связку круга на шероховатость поверхности, следует провести анализ вероятностной функции $\Phi(\xi)$, описывающей вероятность не удаленного металла с поверхности обрабатываемого образца при абразивной обработке [8]. В случае доводки абразивными зернами одинакового размера без учета радиальной подачи обрабатываемого образца вероятностная функция $\Phi(\xi)$ принимает вид:

$$\Phi(\xi) = e^{-\frac{2 \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (5)$$

где 2γ – угол при вершине конусообразной части режущего зерна; n – количество абразивных зерен, участвующих в процессе резания; B – ширина обрабатываемого образца, м; y – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

При наличии радиальной подачи образца функцию $\Phi(\xi)$ необходимо рассматривать результатом вероятностного суммирования элементарных функций $\Phi_i(\xi)$, описываемых зависимостью (5), от работы зерен, вершины которых расположены в бесконечно малом интервале dy_i на удалении y_i от начала координаты y . Принимая, что количество вершин зерен dn_i , попавших в интервал dy_i , равно $dn_i = n \cdot f(\xi) \cdot dy_i$, а $f(\xi) = 1/b$, после вероятностного суммирования элементарных функций $\Phi_i(\xi)$ в пределах от 0 до y , получено:

$$\Phi(\xi) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(\xi) = e^{-\int_0^y \frac{2 \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot (-y_i)}{B} dn} = e^{-\int_0^y \frac{2 \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot (-y_i)}{B \cdot b} dy_i} = e^{-\frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B \cdot b} \cdot y^2}, \quad (6)$$

где $f(\xi)$ – условная плотность распределения по координате y вершин зерен, оставивших свои проекции на движущемся вглубь рабочей поверхности круга обрабатываемом образце.

Функция $\Phi(\xi)$, описываемая зависимостью (6), определяет вероятность не удаленного материала зернами, которые имеют одинаковую высоту выступания над уровнем связки круга. Поскольку «утопание» зерен в связку круга приводит к фактически одинаковой высоте их выступания над уровнем связки, то можно полагать, что зависимость (6) описывает именно данный случай шлифования.

Параметр шероховатости поверхности R_{max} , принимая $b = b_1$, определяется из условия:

$$y = R_{max} = \sqrt{\frac{-\ln \Phi(\xi = R_{max}) \cdot B \cdot b_1}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}}. \quad (7)$$

Для случая $\Phi(\xi = R_{max}) = 0,895$ с учетом $-\ln \Phi(\xi = R_{max}) = 2,25$, получено:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{2,25 \cdot B \cdot b_1}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}}. \quad (8)$$

Как видно, параметр шероховатости поверхности R_{max} тем меньше, чем меньше параметр b_1 и больше n .

С учетом разновысотного расположения вершин зерен над уровнем связки круга, функцию $\Phi(\xi)$ необходимо рассматривать результатом вероятностного суммирования элементарных функций $\Phi_i(\xi)$, описываемых зависимостью (6), от работы зерен, вершины которых расположены в бесконечно малом интервале dy_i на удалении y_i от начала координаты y . Принимая условие, при котором количество вер-

шин зерен dn_i , попавших в интервал dy_i , равно $dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy_i$, а $f(y_i) = 1/b$, в результате вероятностного суммирования элементарных функций $\Phi(y_i)$ в пределах от 0 до y функция $\Phi(y)$ выразится:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi(y_i) = e^{-\int_0^y \frac{tg\gamma \cdot n \cdot dy_i}{B \cdot b}} = e^{-\int_0^y \frac{tg\gamma \cdot n \cdot dy_i}{B \cdot b^2}} = e^{-\frac{tg\gamma \cdot n}{3 \cdot B \cdot b^2} \cdot y^3}. \quad (9)$$

Параметр шероховатости поверхности R_{max} , при $b = b_2$, определяется из условия:

$$y = R_{max} = \sqrt[3]{\frac{-3 \cdot \ln \Phi(y = R_{max}) \cdot B \cdot b_2^2}{tg\gamma \cdot n}}. \quad (10)$$

Для случая $\Phi(y = R_{max}) = 0,895$ с учетом $-\ln \Phi(y = R_{max}) = 2,25$, получено:

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{6,75 \cdot B \cdot b_2^2}{tg\gamma \cdot n}}. \quad (11)$$

От зависимости (11) можно перейти к зависимости (4), принимая $n = k \cdot V \cdot V_{кр} \cdot b_2 / V_{дем}$ с учетом зависимостей (2) и (3).

Из полученной зависимости (11) следует, что уменьшить параметр шероховатости поверхности R_{max} можно уменьшением параметра b_2 и увеличением n . Как видно, параметры b_1 , b_2 , n входят в зависимости (8) и (11) с разными степенями, что указывает на различия в формировании шероховатости поверхности для двух рассматриваемых случаев шлифования.

Обозначая в зависимости (8) параметр R_{max} через R_{max1} , а в зависимости (11) параметр R_{max} через R_{max2} , после преобразований зависимостей (8) и (11) имеем:

$$R_{max2} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot b_2^2 \cdot R_{max1}^2}{b_1}}. \quad (12)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость, увязывающая параметры шероховатости поверхности R_{max1} и R_{max2} , которые достигаются при шлифовании кругом с фактически одновысотным выступанием зерен над уровнем связки и кругом с разновысотным выступанием зерен над уровнем связки. Задавая значения параметров R_{max1} , b_1 и b_2 , по зависимости (12) можно рассчитать значения параметра R_{max2} . На основе сравнения значений параметров R_{max1} и R_{max2} оценивается степень влияния «утопания» зерен в связку круга на шероховатость обработанной поверхности.

Пример расчета. Для исходных данных: $R_{max1} = 1$ мкм; $b_1 = 3$ мкм; $b_2 = 24$ мкм определено значение $R_{max2} = 8,3$ мкм. Этим показано, что за счет «утопания» зерен в связку круга параметр шероховатости поверхности R_{max} уменьшился с 8,3 до 1 мкм, т.е. в 8,3 раза. Это указывает на существование значительных резервов уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности при шлифовании в связи с обеспечением «утопания» зерен в связку круга.

Полученное теоретическое решение согласуется с известными экспериментальными данными. Так, в работе [2] экспериментально установлено, что при шлифовании напыленного сплава СНГН торцом алмазного чашечного круга на металлической связке М1-01 параметр шероховатости обрабатываемой поверхности R_a принимает значительно большие значения (до 10 раз и более), чем при шлифовании алмазными кругами на относительно мягких органических связках Б1 и БР.

Как известно, металлическая связка М1-01 характеризуется большей твердостью по сравнению со связками Б1 и БР. Поэтому алмазные зерна фактически не «утопают» в металлическую связку М1-01 и «утопают» на значительную глубину в связки Б1 и БР, что приводит к увеличению количества одновременно работающих зерен и уменьшению параметра шероховатости R_a . Такая же закономерность вытекает из зависимости (12). Следовательно, используя зависимость (12), можно аналитически подходить к оценке влияния глубины «утопания» режущих зерен в связку круга на шероховатость обработанной поверхности при шлифовании.

В связи с этим, при шлифовании ответственных высокоточных деталей гидроаппаратуры с целью уменьшения шероховатости поверхности были использованы абразивные круги, обеспечивающие «утопание» режущих зерен в связку круга и фактически их одновысотное расположение на рабочей поверхности. Экспериментально установлено, что вследствие разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга весьма сложно стабильно обеспечить выполнение 10-11 классов чистоты при шлифовании деталей гидроаппаратуры, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами и характеризующихся плохой обрабатываемостью резанием и шлифованием. Так, практикой установлено, что для обеспечения чистоты обработки на уровне 11 класса при изготовлении ответственной цилиндрической детали из материала 95Х18 твердостью $HRC_3 \geq 56$ после операции шлифования абразивным кругом ПП 350×40×127 14А 16С традиционно применяется ручная доводка на притире абразивной пастой 64С М7. Этим обеспечивается требуемая шероховатость поверхности и точность размера 0,002 мм. Однако технологический процесс характеризуется высокой трудоемкостью обработки. В связи с этим, предложено вместо трудоемкой операции притирки использовать шлифование кругом ПП 300×30×127 16С F320P7V (производство Словении) на современном высокоточном станке «Okamoto» со съемом припуска 0,01 – 0,02 мм на сторону. В итоге стабильно достигается шероховатость поверхности на уровне 11 класса чистоты, овальность и конусность находятся в пределах 0,005 мм, что вполне соответствует требованиям на обработку. Необходимо отметить, что эффект обработки достигнут за счет применения шлифовального круга, который отвечает вышеуказанным требованиям с точки зрения снижения шероховатости поверхности путем уменьшения разновысотности расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга.

Аналогичные цилиндрические детали гидроаппаратуры традиционно обрабатывались шлифованием первоначально абразивным кругом ПП 350×40×127 14А 25С, затем абразивным кругом ПП 400×32×127 ЕК 320-85 и окончательно на операции доводки концевым притиром и абразивной пастой 64С М7. В результате достигалась шероховатость поверхности $R_a = 0,16$ мкм, что соответствует 10 классу чистоты. С целью снижения трудоемкости обработки предложено после предварительного шлифования выполнить окончательное шлифование на современном высокоточном станке «Okamoto» абразивным кругом ПП 300×30×127 16С F320P7V с частотой вращения круга 18000 об/мин. В результате обеспечивается шероховатость $R_a = 0,16$ мкм и требуемый допуск радиального биения в пределах 0,005 мм.

Таким образом, установлено, что применение кругов, обладающих повышенной режущей способностью и характеризующихся небольшой разновысотностью зерен, позволяет исключить трудоемкую ручную обработку на операциях доводки при обеспечении высоких показателей шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей.

ВЫВОДЫ

1. Получено новое теоретическое решение задачи о закономерностях формирования шероховатости поверхности при шлифовании, как с учетом, так и без учета разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности круга. Это позволило определить основные условия уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании.

2. Теоретически доказано, что, обеспечивая при шлифовании «утопание» зерен в связку круга, можно существенно уменьшить шероховатость поверхности. Эффект обработки в этом случае состоит в том, что фактически исключается разновысотное расположение абразивных зерен на рабочей поверхности круга и, тем самым, обеспечивается увеличение количества одновременно работающих зерен.

3. Приведенные примеры практической реализации теоретических решений указывают на их достоверность, а также на возможность существенного уменьшения шероховатости поверхности (до уровня обработки свободным абразивом) на операциях шлифования деталей гидроаппаратуры при одновременном снижении трудоемкости обработки. Это позволило в ряде случаев заменить шлифованием традиционную обработку свободным абразивом, при которой происходило шаржирование абразивных зерен в обрабатываемую поверхность.

Перечень ссылок

1. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования металлов / *Е.Н. Маслов.* – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / *Э.В. Рыжов.* – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с.
3. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. *А.Н. Резникова.* – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
4. *Королев А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / *А.В. Королев.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
5. *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / *Ю.К. Новоселов.* – Саратов, 1979. – 232 с.
6. *Хусу А.П.* Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / *А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов.* – М.: Изд-во «Наука», 1975. – 343 с.
7. *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / *Ф.В. Новиков.* – Одесса, 1995. – 36 с.
8. *Новиков Ф.В.* Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятностей / *Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий* // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. – Х.: НТУ «ХП». – 2004. – № 44. – С. 140-149.

Рецензент д. т. н., проф. Суглобов В. В.

Статья поступила 10.12.2014