

УДК 621.923

DOI:10.30987/2223-4608-2020-9-7-11

**Ю.М. Зубарев**, д.т.н.

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3)

**А.В. Приёмывшев**, к.т.н.

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

E-mail: iuzubarev@mail.ru; priemyshev52@mail.ru

## **Повышение эффективности плоского шлифования за счет применения рациональных рабочих циклов**

*Рассмотрена возможность значительно повысить эффективность обработки заготовок деталей машин за счет применения высокоскоростных шлифовальных станков, работающих по автоматическому циклу изменения режимов обработки. Это позволяет на одном станке выполнять операции чернового, а затем чистового шлифования, обеспечивая требуемую точность и качество обработанных поверхностей. Применение высокоскоростного силового шлифования позволяет отказаться от чернового и чистового предварительного фрезерования, и, тем самым, уменьшить количество станочного оборудования, твердосплавного режущего инструмента, производственных площадей и повысить производительность труда.*

**Ключевые слова:** шлифование; рабочие циклы; производительность; скорость резания; точность обработки; качество поверхности; штучное время; основное время.

**Yu.M. Zubarev**, Dr. Sc. Tech.

(Saint-Petersburg State Marine Technical University,  
3, Lotsmanskaya Str., Saint-Petersburg)

**A.V. Priyomyshev**, Can. Sc. Tech.

(Peter The Great Polytechnic University of Saint-Petersburg,  
29, Polytechnicheskaya Str., Saint-Petersburg)

## **Flat grinding effectiveness increase due to rational work cycle use**

*A possibility for machinery billet machining effectiveness increase at the expense of the use of high-speed grinding machines operated in an automated cycle of machining mode changes is considered. It allows performing operations of roughing and then finishing ensuring the required accuracy and quality of surfaces worked. The application of high-speed force grinding allows rejecting rough and finish preliminary milling and, in such a way, decreasing the number of machine equipment, hard-alloy cutters, production areas and increasing labor productivity.*

**Keywords:** grinding; work cycles; productivity; cutting speed; processing accuracy; surface quality; floor-to-floor time; prime time.

Операция шлифования обычно завершает цикл механической обработки заготовки и определяет конечный этап, точность и качество

поверхности детали. Шлифование рассматривают как метод чистовой обработки, дающий возможность достигнуть 5 – 7 квалитет точно-

сти и заданное качество обработанной поверхности.

Создание и выпуск за последнее время шлифовальных станков с ЧПУ, в том числе работающих по автоматическому циклу изменения режимов обработки с плавным изменением скорости резания, позволяет существенно изменить структуру шлифовальной операции. Это дает возможность технологу осуществлять управление процессом обработки по параметру скорости резания и соединять в одной операции существенное увеличение скорости съема металла (как основное преимущество высокоскоростного шлифования) с достижением высокой точности выполняемых размеров и заданного качества поверхности.

Основой для создания таких операций при обработке различных материалов абразивным инструментом из электрокорунда и эльбора являются работы, выполненные ранее авторами, и полученными на их основе выводами и рекомендациями, обусловленные влиянием скорости резания на силы резания, износ и период стойкости шлифовальных кругов, контактную температуру шлифования, а также точность и качество обработанных поверхностей [1, 2].

Обработку с разными скоростями резания в таких случаях можно осуществлять в одну операцию и производить на одном станке. При этом возможно как ступенчатое изменение скорости резания, так и плавное (если конструкция станка позволяет это сделать).

Существующие в настоящее время варианты шлифования, как правило, разделяют обработку заготовки на две-три операции (например, черновую, чистовую и тонкую) и выполнение каждой осуществляется на отдельном станке, настроенном на определенную скорость резания. При этом увеличивается вспомогательное время, а точность получаемых размеров уменьшается по сравнению с первым случаем, когда обработка ведется с одного станка. Для получения оптимального варианта обработки необходимо производить изменение скорости резания, учитывая конкретные условия выполнения операции, рекомендуемые для каждого этапа обработки, технические возможности станка и абразивного инструмента.

Производительность процесса обработки зависит от основного времени  $T_0$ , необходимого для снятия припуска с заготовки; вспомогательного времени  $T_{в}$  на установку и снятие заготовки, ее измерение, управление станком и времени обслуживания  $T_{обсл}$ . Основную

часть времени обслуживания занимает процесс периодической правки круга.

Результаты проведенных исследований показывают, что с увеличением скорости резания появляется возможность увеличить интенсивность съема металла при сохранении периода стойкости электрокорундового круга постоянным [1]. Поэтому можно считать, что время, затрачиваемое на правку круга, не изменяется, и для определения изменения штучного времени можно учитывать только изменение основного времени, считая вспомогательное время и время обслуживания постоянным при изменении скорости резания.

Основное время при шлифовании можно определить из выражения [4]:

$$T_0 = Q / Q_{ном}, \quad (1)$$

где  $Q$  – объем металла, подлежащий снятию;  $Q_{ном}$  – действительный объем снятого металла в единицу времени.

Изменение скорости резания приводит к пропорциональному изменению числа режущих кромок, проходящих зону шлифования в единицу времени (кинематический эффект); к изменению силы, действующей на каждую режущую кромку при одном сечении среза, выдерживаемого вершиной абразивного зерна (скоростной эффект); к изменению критического отношения  $a_z/p$ , характеризующего момент начала резания (статический эффект).

Следовательно, при высокоскоростном шлифовании  $Q_{ном}$  приближается к  $Q$ .

Для плоской заготовки  $Q = b l z$ , (2) где  $l$  и  $b$  – длина и ширина обрабатываемой поверхности заготовки, мм;  $z$  – припуск на обработку, мм.

Значения скорости съема металла можно определить по формуле

$$Q_{ном} = Q_{уд} \cdot B / K_c, \quad (3)$$

где  $B$  – высота круга, мм;  $K_c$  – коэффициент съема металла, зависящий от жесткости технологической системы, радиальной составляющей силы резания и износа круга, характеристики круга и обрабатываемости металла [5];  $Q_{уд}$  – скорость съема металла на единицу высоты шлифовального круга.

$$Q_{уд} = 9,2 \cdot 10^4 \cdot (a_z^2)_{cp} \cdot N_p \cdot v_k (1 - \epsilon_B) \cdot \sqrt{D \rho}, \quad (4)$$

где  $a_z$  – среднее значение толщины среза единичным абразивным зерном в круге [1];  $N_p$  – количество активных режущих кромок на единице рабочей поверхности круга, проходящих зону шлифования за 1 мин [1];  $D$  – диаметр шлифовального круга, мм;  $v_k$  – скорость шлифовального круга, м/с;  $\rho$  – средний радиус округления вершин ре-

жущих кромок абразивного зерна, мкм;  $\varepsilon_B$  – коэффициент выдавливания, зависящий от скорости резания и пластических свойств обрабатываемого материала [5].

Подставляя в формулу (1) выражения (2), (3) и (4) получим выражение для  $T_0$ :

$$T_0 = \frac{bl \approx k_c}{9,2 \cdot 10^{-4} \cdot a_{zcp}^2 \cdot v_k \cdot N_p \cdot (1 - \varepsilon_H) \cdot B \cdot \sqrt{Dp}} \cdot (5)$$

В полученной зависимости можно выделить влияние скорости резания на производительность в виде трех основных эффектов: кинематического ( $v_k$ ), скоростного ( $a_{zcp}$ ) и статического ( $N_p$ ) [1, 3].

По формуле (5) можно рассчитать основное время всего цикла и отдельного этапа. Как видно из зависимости, увеличение скорости резания приводит к пропорциональному уменьшению основного времени обработки.

Для получения оптимального варианта обработки необходимо определить влияние скорости резания на факторы, ограничивающие повышение производительности: качество шлифованных поверхностей, точность размеров и геометрические формы заготовки.

Достижение заданной точности обработки имеет важное значение при чистовых операциях шлифования. Для определения влияния скорости резания на точность размеров и геометрическую форму заготовок исследовалось изменение отношения одноименных погрешностей заготовки до  $\Delta'_z$  и после обработки  $\Delta'_z$ , т.е. уточнение  $\varepsilon = \Delta'_z / \Delta_z$ .

Фактическая точность размеров и геометрической формы обработанных заготовок в сильной степени зависит от изменения величины отжатий в упругой технологической системе вследствие колебания нормальной составляющей силы резания  $P_y$ . Величина

$\Delta'_z \text{ max}$  ( $t = 0,01$  мм) шлифования после трех рабочих ходов погрешность заготовки, переносимая с предыдущих переходов, становится равной погрешности обработки на данном станке, а при более интенсивных режимах шлифования ( $t > 0,01 \dots 0,02$  мм) для этого необходимо провести четыре-пять рабочих ходов «выхаживания» без подачи круга на глубину.

Определенное экспериментально для разных скоростей резания минимальное значение отклонения от плоскости и прямолинейности при обработке закаленной стали 45 кругом 24AF60KV43 равно 0,004 мм, что соответствует четвертой степени точности при толщине заготовки 25 мм. При этом точность полученных размеров для заготовок, имеющих толщину свыше 6 мм, находится в пределах

5 квалитета точности и не зависит от скорости резания.

С точки зрения достижения наивысшей и стабильной точности изготовления деталей обработка с повышенной скоростью резания выгоднее, так как процесс в этом случае характеризуется снятием более тонкой стружки (с увеличением скорости резания значения отношения  $a_z/p$  уменьшаются) и влияние причин, вызывающих рассеяние размеров и появление погрешности геометрической формы заготовок, уменьшается [3, 4].

Одновременно при больших скоростях вращения шлифовального круга и перемещениях стола с заготовкой на точности обработки сказываются вибрации, возникающие в связи с неравномерностью износа круга. Поэтому преимущество увеличения скорости резания почти не реализуется. Уменьшение скорости стола с изделием может отрицательно сказываться на тепловом балансе обработки и качестве шлифуемой поверхности. Поэтому для снятия основной части припуска необходимо работать с наибольшей рекомендуемой скоростью резания, а затем для достижения заданной точности размеров и качества обработанной поверхности необходимо переходить на более низкие скорости. В этом случае образующиеся при неравномерном износе волны на поверхности круга сглаживаются.

Необходимость уменьшения скорости резания на этапе «выхаживания» диктуется еще и тем, что при шлифовании с большими скоростями не рекомендуется допускать затупление круга до образования площадок износа с диаметром 40...60 мкм, так как при таком износе составляющая силы резания и сила трения возрастают пропорционально площадке износа. При этом увеличивается величина погрешности обработки вследствие упругих отжатий системы «шлифовальный круг – стол станка».

Таким образом, увеличение скорости резания на операции плоского шлифования позволяет уменьшить число ходов при снятии основного припуска и тем самым значительно сократить основное время обработки, не ухудшая качества шлифуемой поверхности и не снижая точности получаемых размеров.

Выбор варианта построения рациональной структуры операции плоского шлифования с использованием высоких скоростей резания зависит от того, какая из двух задач решается:

- увеличение скорости съема металла примерно пропорционально увеличению скорости резания при достижении высоких тре-

бований к точности получаемых размеров и качеству обработанных поверхностей;

- резкое увеличение скорости съема металла с жесткими требованиями к точности получаемых размеров и качеству поверхности.

Плоскошлифовальный станок с крестовым прямоугольным суппортом и горизонтальным шпинделем мод. ЗЕ711ИВ, оснащенный тиристорным приводом вращения круга конструкции ВСКБЗШ и ЗС, модернизированный на расширенный диапазон изменения скоростей резания (17...70 м/с), для которого разрабатывались варианты обработки, позволяет осуществить решение этих задач в автоматическом цикле.

Последовательность автоматического цикла следующая. После установки заготовки на станке производится шлифование на черновых режимах. Далее происходит автоматическое переключение на чистовой режим, уменьшаются вертикальные и поперечные подачи и скорости продольного перемещения стола. По достижении заданного размера от-

ключается вертикальная подача и начинается «выхаживание», число рабочих ходов которого предварительно настраивается. После окончания «выхаживания» происходит отскок шлифовальной головки на заранее настроенную величину, остановка стола в крайнем правом положении, а суппорта – в переднем. Цикл окончен.

В автоматический цикл обработки включена автоматическая правка шлифовального круга после определенного, настраиваемого заранее, числа циклов. С механизмом правки кинематически связано устройство регулирования скорости круга. При уменьшении диаметра круга подается электрическая команда на увеличение частоты вращения шпинделя. Автоматизация цикла осуществляется путем измерения текущего размера заготовки с помощью прибора активного контроля БВ-4138 и подачи соответствующих команд для измерения скоростей и подач. В табл. 1 показан вариант обработки для решения первой задачи.

**1. Режимы обработки и технологические параметры рабочих циклов плоского шлифования заготовки из стали 45 (44...48 HRC) кругом 24AF60KV43**

Режимы и технологические параметры	Черновое		Чистовое		«Выхаживание»	
	$v_k$ постоянная	$v_k$ переменная	$v_k$ постоянная	$v_k$ переменная	$v_k$ постоянная	$v_k$ переменная
$v_k$ , м/с	35	60	35	35	35	20
$v_d$ , м/мин	20	40	20	20	20	12
$v_k/v_d$	100	90	100	100	100	100
$S_{п.п.}$ , мм/ход	4	4	4	4	4	4
$t$ , мм	0,03	0,04	0,02	0,02	-	-
Номинальный припуск, $z_n$ , мм	0,3	0,3	0,1	0,1	0,02	0,015
$Q_n$ , мм <sup>3</sup>	12000	13200	4000	4000	960	650
$Q_{факт}$ , мм <sup>3</sup>	11160	12672	3880	3880	960	650
$Q_{уд}$ , мм <sup>3</sup> /(мм·мин)	160	320	80	80	48	22
Время обработки, мин	3,5	2,0	2,4	2,4	1,5	1,5
Время переходного периода, мин	-	0,1	-	0,1	-	-
Число ходов «выхаживания»	-	-	-	-	3	2
Глубина дефектного слоя, мм	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01
$Ra$ , мкм	1,2	1,4	0,9	0,9	0,5	0,5
Основное время на операцию	-	-	-	-	7,4	0,1
Отклонение от плоскостности	-	-	-	-	0,005	0,005

Для примера на рис. 1 приведен цикл операции шлифования плоскостей разъема корпусов редукторов из серого чугуна СЧ20, разработанный для замены существующих операций фрезерования, выполняемых на 2-х продольно-фрезерных станках (черновое фрезерование, а затем чистовое).

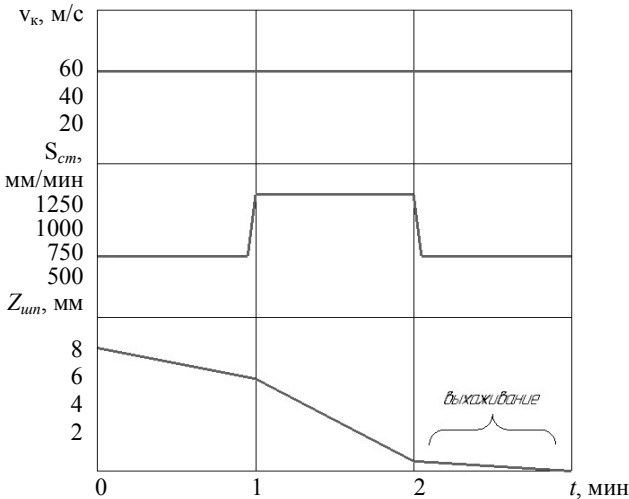


Рис. 1. Рабочий цикл операции шлифования плоскостей разъема корпуса редуктора

Длина одного корпуса 640 мм, ширина 450 мм. Припуск на обработку  $8 \pm 2$  мм. Фрезерная операция осуществляется в два перехода с установкой на столе станка шести корпусов и обработкой трех корпусов одновременно:

- предварительное фрезерование – скорость резания  $v = 64$  м/мин; продольная подача  $s = 250$  мм/мин; глубина резания  $t = 6$  мм;
- чистовое фрезерование –  $v = 102$  м/мин;  $s = 250$  мм/мин;  $t = 2$  мм.

Основное время для одной заготовки  $T_{01} = 12$  мин. Штучное время – 51,6 мин. Достижимая шероховатость поверхности  $Rz = 20$  мкм.

Замену фрезерной операции на шлифовальную можно осуществить, используя торцшлифовальный станок мод. 3М758, имеющий скорость резания 60 м/с и мощность электродвигателя главного движения 100 кВт. В качестве абразивного инструмента целесообразно использовать сегментные круги СК 140×60/50×250 14AF1000В, изготовленные методом горячего прессования.

Цикл осуществлялся в три рабочих хода. Первый – работа по литейной корке с глубиной резания  $t = 2$  мм,  $s = 750$  мм/мин,  $v_k = 60$  м/с. Второй – снятие основного припуска, режимы резания:  $v_k = 60$  м/с,  $s = 1250$  мм/мин,  $t = 6$  мм. Третий – один ход

«выхаживания» с  $v_k = 60$  м/с,  $s = 750$  мм/мин для получения заданной шероховатости поверхности. Основное время обработки для одной заготовки  $T_{01} = 2,6$  мин.

Применение такого цикла позволило уменьшить основное время в 4,6 раз, а штучное – примерно в 2 раза, заменить два фрезерных станка одним шлифовальным, высвободить двух рабочих.

### Вывод

Применение комбинированных циклов с использованием рациональных скоростей резания позволяет значительно увеличить производительность обработки, обеспечить заданные значения точности получаемых размеров и геометрической формы заготовок, качества шлифованных поверхностей с сохранением постоянных значений периода стойкости шлифовального круга, т.е. повысить эффективность операции плоского шлифования обрабатываемых материалов электрокорундовыми кругами.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 304 с.
2. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В. Устойчивость процесса шлифования с учетом его динамических характеристик. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 388 с.
3. Зубарев, Ю.М. Математические основы управления качеством и надежностью изделий. – СПб.: Изд-во «Лань», 2017. – 176 с.
4. Сулов, А.Г. Технология машиностроения. – М.: Машиностроение, 2004. – 397 с.
5. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

### REFERENCES

1. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V. *Theory and Practice of Material Grinding Effectiveness Increase*. – S-Pb.: “Lan” Publishers, 2010. – pp. 304.
2. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V. *Grinding Stability Taking into Account Its Dynamic Characteristics*. – S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University, 2016. – pp. 388.
3. Zubarev, Yu.M. *Mathematical Fundamentals in Product Quality and Reliability Control*. – S-Pb.: “Lan” Publishers, 2017. – pp. 176.
4. Suslov, A.G. *Mechanical Engineering Technology*. – M.: Mechanical Engineering, 2004, - pp. 397.
5. *Technologist’s Reference Book* / under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2019. – pp. 800.

Рецензент д.т.н. В.А. Носенко