

УДК 621.923

DOI:10.30987/2223-4608-2021-8-41-46

Ю.М. Зубарев, д.т.н.

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

А.В. Приемышев, к.т.н.

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

E-mail: iuzubarev@mail.ru; priemishev52@mail.ru

Повышение эффективности плоского глубинного шлифования

Рассмотрена возможность повышения эффективности плоского глубинного шлифования заготовок деталей машин за счет применения высокоскоростной обработки, а также шлифование по автоматическому циклу изменения режимов шлифования. Применение высокоскоростного глубинного шлифования, например, пазов или профиля замка турбинных лопаток, позволяет отказаться от предварительного их фрезерования, производить обработку с одной установки и на одном станке, что повышает точность обработки и ее производительность.

Ключевые слова: шлифование; производительность; скорость резания; точность обработки; качество поверхности; рабочие циклы.

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

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

A.V. Priemyshev, Can. Sc. Tech.

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

Effectiveness increase of flat deep grinding

There is considered a possibility of effectiveness increase of machinery billet flat deep grinding at the expense of high-speed machining use and also grinding on an automatic cycle of grinding mode changes. The application of high-speed deep grinding, for instance, slots or profiles of turbine blade locks allows rejecting their preliminary milling, carrying out single position machining on one machine which increases machining accuracy and its capacity.

Keywords: grinding; capacity; cutting speed; machining accuracy; surface quality; working cycles.

Шлифование является одним из технологических методов обработки разнообразных поверхностей – плоских, круглых, фасонных и др. Созданные в последние годы высокоскоростные шлифовальные и заточные станки, в том числе и станки с ЧПУ, а также станки, работающие на повышенных скоростях резания, позволяют значительно повысить производи-

тельность процесса обработки и качества изделий. Большое влияние на выходные показатели процесса шлифования оказывают правильно назначенные режимы обработки, рационально выбранные характеристики абразивного инструмента, а также шлифование с применением автоматических циклов изменения режимов обработки.

В настоящее время считается установленным, что увеличение скорости съема металла, т.е. увеличение производительности процесса обработки, может быть достигнуто путем повышения скорости резания. Вместе с этим успешное внедрение этого метода требует определения области эффективного применения высокоскоростного шлифования и разработки соответствующих технологических рекомендаций [1, 2].

Производительность любой технологической операции определяется количеством заготовок, обработанных в единицу времени на конкретном станке. Повышение окружной скорости шлифовального круга позволяет значительно уменьшить основное время обработки. Для обоснования этого положения следует рассмотреть функциональную зависимость скорости съема металла от скорости круга и других технологических параметров обработки.

Значительная доля эффекта, наблюдаемого

$$Q_{уд} = 2 \cdot 10^4 \cdot a_z^2 \cdot N_p \cdot v_k \cdot \sqrt{D \cdot \rho} \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{мин},$$

где a_z^2 – толщина среза одной режущей кромкой на рабочей поверхности круга, мкм; N_p – число «активных» (режущих) кромок на единице поверхности круга, мм⁻²; v_k – скорость круга, м/с; D – диаметр круга, мм; ρ – средний радиус округления вершин «активных» (режущих) кромок, мкм.

Выполненные исследования по оценке параметров рельефа рабочих поверхностей, электрокорундовых, эльборовых и алмазных кругов, а также предельных сечений среза, выдерживаемых эльборовыми и электрокорундовыми зернами без разрушений, позволяют теоретически рассчитать значения удельного съема металла для различных скоростей резания. Полученные данные свидетельствуют о том, что увеличение скорости резания с 17 до 35 м/с дает возможность в 1,5 – 2 раза увеличить скорость съема металла, а увеличение скорости с 35 до 70 м/с приводит к увеличению удельного съема металла в 2,8 – 3,5 раза [2].

Кроме того, с повышением окружной скорости шлифовального круга фактическая глубина резания приближается к номинальной. В связи с этим уменьшается отставание фактической скорости съема металла от номинальной при одно- или многоходовом шлифовании. Это также повышает производительность и точность процесса обработки.

В условиях плоского шлифования подвод технологической жидкости (СОТЖ) в зону резания затрудняется не только из-за создания

при повышении скорости резания, заключается в уменьшении сопротивления резания, т.е. непосредственном действии скорости деформации на усилие резания при срезании стружки, уменьшении пластической деформации металла и отношения a_z/ρ , характеризующее момент начала стружкообразования. Это приводит к увеличению предельной толщины среза, выдерживаемой каждой режущей кромкой шлифовального круга. Кроме того, с увеличением скорости резания в совокупности режущих кромок абразивных зерен на рабочей поверхности круга, контактирующих с заготовкой, увеличивается количество кромок, срезающих стружку, и соответственно уменьшается количество кромок, производящих только работу упруго-пластической деформации [1, 2].

Анализ и количественную оценку влияния скорости резания на удельный съем металла при плоском шлифовании можно выполнить из зависимости [2]:

интенсивным воздушным потоком области высокого давления, не «пропускающего» жидкость в зону контакта, но и за счет полужакрытой зоны обработки, получающейся вследствие плоской формы обрабатываемой заготовки. В результате процесс шлифования идет при высоких контактных температурах, что приводит к структурным изменениям в металле поверхностного слоя, прижогам на обработанной поверхности, трещинам и другим отрицательным явлениям. В этом случае важно выбрать оптимальное соотношение $v_k/v_{ин}$, исходя из технических возможностей станка и характерных особенностей метода обработки [2, 3].

В результате лабораторных и производственных исследований установлено, что для плоского шлифования с возвратно-поступательным движением стола с закрепленной заготовкой наиболее оптимальным, с точки зрения достижения требований чертежа деталей к точности размеров и качеству обработанных поверхностей, является отношение $v_k/v_{ин} = 100$. Причем, при работе на повышенных скоростях резания по сравнению с обычными (30...35 м/с) достигается существенное

увеличение производительности обработки. Стремление к снижению этого отношения за счет повышения скорости v_n приводит к снижению точности обработки из-за появления вибраций, возникающих в технологической системе за счет неравномерности износа круга и других причин. В этом случае преимущества увеличения скорости резания почти не реализуются [3].

Уменьшение v_n отрицательно сказывается на температурном балансе процесса обработки, ведет к снижению характеристик качества шлифованной поверхности. Поэтому при проектировании операций плоского шлифования конкретных заготовок удаление основного слоя припуска (~ 90 %) необходимо производить при наибольшей рекомендуемой скорости резания. Оставшуюся часть припуска необходимо снимать с переходом на более низкие скорости резания и с желательным сохранением отношения $v_k/v_n = 100$ для достижения заданной точности размеров и качества обработанной поверхности.

Такой подход позволяет выполнять операцию плоского шлифования в несколько этапов или в цикле, а автоматическое изменение режимов резания, включая и скорость резания, дает возможность производить только один технологический переход. При этом на этапе снятия основного припуска увеличение скорости резания приводит к уменьшению числа рабочих ходов за счет повышения скорости съема металла, что значительно уменьшает основное время обработки, а автоматическое изменение режимов резания снижает вспомогательное время, связанное с переходом. В результате повышается производительность обработки, которую можно предварительно оценить, рассчитав удельную скорость съема металла $Q_{уд}$ по известной формуле [2]:

$$Q_{уд} = \frac{Q_n \cdot K_c}{H} \frac{\text{мм}^3}{\text{мм} \cdot \text{мин}},$$

где H – высота круга, мм; Q_n – скорость съема металла, задаваемая режимом обработки, $\text{мм}^3/\text{мин}$; K_c – коэффициент съема металла, зависящий от жесткости технологической системы, радиальной составляющей силы резания и износа круга, характеристики круга и физико-механических свойств обрабатываемого материала [4].

Характерной особенностью плоского глубинного шлифования является значительное увеличение поверхности контакта круга с обрабатываемой заготовкой и, соответственно,

количества вершин абразивных зерен, участвующих в работе шлифования, что приводит к высокой производительности процесса по основному технологическому времени. При этом средняя толщина срезов a_z , приходящаяся на каждую вершину зерна, уменьшается, а длина срезов – увеличивается [2].

Результаты расчета средней толщины среза a_z для случая плоского шлифования кругом 24AF80K 6...7V при постоянном удельном съеме металла ($Q_{уд} = 10,7 \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$), но с разным сочетанием глубины и продольной подачи показали, что переход от многоходового к глубинному шлифованию приводит к уменьшению a_z , примерно в 12 раз, при этом длина среза увеличивается в 30 – 40 раз. Дополнительным резервом уменьшения a_z , а значит и нагрузки на каждую вершину зерна, является увеличение скорости резания.

Если задаться определенным значением a_z , являющимся предельным для работы без катастрофического износа круга (например, $a_z = 3 \text{ мкм}$), то переход от многоходового к глубинному шлифованию позволяет увеличить удельный съем металла в десятки раз. Расчетные значения удельного съема металла, получаемые при переходе от многоходового к глубинному шлифованию, приведены на рис. 1.

Дополнительным резервом увеличения производительности операций шлифования является работа с повышенными скоростями резания. Как следует из рис. 1 с увеличением скорости от 17 до 50 м/с удельный съем металла при шлифовании может быть увеличен в 5 – 6 раз. В реальных условиях работа с такой скоростью съема металла пока невозможна главным образом из-за больших сил резания. Предельные значения удельного съема металла, полученные в практике шлифования на отдельных операциях, значительно меньше. Так, при глубинном шлифовании пазов $3 \times 10 \text{ мм}$ в стали 45 $Q_{уд} = 13,3 \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$ [2], при шлифовании профиля замков турбинных лопаток $Q_{уд} = 60 \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$ [3].

Очевидно, что ограничения по предельной мощности привода вращения круга, прочности и стойкости круга, теплостойкости абразивных зерен и связки, точности и качеству обработки не позволяют получить столь большие значения удельного съема металла.

Для определения рациональных режимов глубинного шлифования были проведены экспериментальные исследования по шлифованию сталей 45 (HRC 48...52) и 12X18H10T (HRB 65...75) кругами 1 250×70×76

24AF80K 6...7V на модернизированном плоскошлифовальном станке модели 3E711ИВ.

Обобщение результатов выполненной работы позволяет сделать следующие выводы.

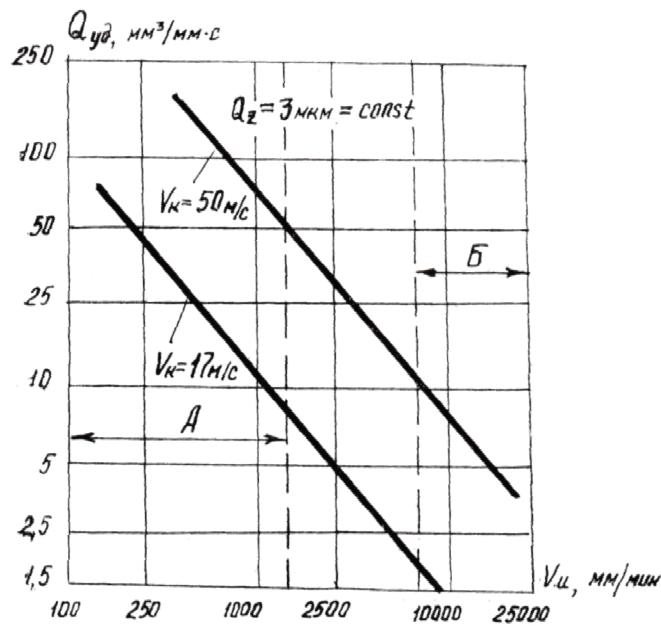


Рис. 1. Зависимость удельного съема $Q_{уд}$ металла от режимов резания при глубинном и многоходовом шлифовании:

А – область глубинного шлифования; Б – область многоходового шлифования

1. Глубинное шлифование выгодно применять как способ существенного увеличения производительности процесса. При слишком малом сечении единичных срезов ($a_z < 1 \text{ мкм}$) процесс становится малоэффективным: вершины многих абразивных зерен из-за недостаточной глубины внедрения скользят по дуге контакта с обрабатываемой поверхностью без образования стружек, нагреваются сами и нагревают металл, не производя полезной работы.

С увеличением удельного съема металла происходит более активное резание. Граничные значения удельного съема металла, начиная с которых наблюдается процесс активного стружкообразования с относительно малыми энергозатратами, равны: $Q_{уд} \geq 3 \text{ мм}^3/\text{мм}\cdot\text{с}$ (при работе по схеме встречного шлифования) и $Q_{уд} \geq 2,5 \text{ мм}^3/\text{мм}\cdot\text{с}$ (при работе по схеме попутного шлифования).

2. Скоростное шлифование применительно к глубинной схеме является дополнительным резервом увеличения съема металла, т.е. повышения производительности обработки. Анализ результатов исследований показал, что увеличение скорости резания от 17 до 50 м/с при глубинном шлифовании стали 45 позволяет повысить удельный съем металла в 4 раза, а при шлифовании стали 12Х18Н10Т –

в 2 раза при примерно постоянных значениях стойкости круга и высоты шероховатости шлифованной поверхности.

3. Большое практическое значение имеет выбор схемы шлифования. Установлено, что при плоском глубинном шлифовании следует назначать попутную схему шлифования, так как при этом в отличие от встречной схемы уменьшается длина пути проскальзывания вершины зерна по металлу на стадии упруго-пластического деформирования, что приводит к снижению сил резания, шероховатости поверхности, износа круга и увеличению его стойкости.

4. Разработаны рациональные технологические условия операций плоского глубинного шлифования и конкретные рабочие циклы обработки, основанные на согласованном изменении скоростей резания и изделия и глубины шлифования. Это позволило повысить производительность операции глубинного шлифования в 1,6 – 1,9 раза с обеспечением заданных параметров качества обработки.

Предлагаемые рабочие циклы могут быть использованы в качестве исходной информации при проектировании систем автоматического управления процессом обработки и при составлении управляющих программ для станков, применяемых в условиях автоматизи-

рованного производства.

5. Для реализации основного преимущества глубинного шлифования по сравнению с многоходовым, т.е. резкое повышение производительности обработки, станкостроительной промышленности необходимо освоить выпуск станков для глубинного шлифования с мощностью привода вращения круга в 5...10 превышающей мощность привода станков, предназначенных для многоходового шлифования. Для реализации преимуществ скоростного глубинного шлифования и управления процессом по скорости резания в новых конструкциях станков необходимо также предусмотреть наличие приводов с бесступенчатым регулированием в широких диапазонах скоростей резания (15...60 м/с) и скоростей подачи (20...2000 мм/мин). При этом для повышения производительности процесса черновую обработку целесообразно выполнять при повышенной скорости резания, а чистовую – при пониженной, обеспечивающей наилучшее качество обработки.

В качестве практических примеров разработки таких циклов ниже приведены два вари-

анта глубинного шлифования прямоугольных пазов.

1. Шлифование паза глубиной 4 мм, шириной 10 мм, длиной 150 мм в заготовке из стали 45 (HRC 48...52) кругом 1 250×10×76 24AF80K 6...7V. Требования к точности размеров: по глубине паза – 4 Н9 по 1 Т9; по ширине паза – 10 Н8 по 1 Т8; радиус, образующийся при пересечении дна паза и его боковой стенки – $r \leq 0,2$ мм. Требования к качеству шлифованной поверхности: высота шероховатости – $Ra \leq 0,6$ мкм, прижоги не допускаются. Наиболее рациональный рабочий цикл обработки заданного паза будет следующий (рис. 2): первый рабочий ход – $v_k = 50$ м/с, $v_n = 320$ мм/мин, $t = 1,79$ мм; второй рабочий ход – $v_k = 50$ м/с, $v_n = 320$ мм/мин, $t = 1,77$ мм, правка круга на глубину 0,28 мм; третий рабочий ход – $v_k = 17$ м/с, $v_n = 160$ мм/мин, $t = 0,534$ мм.

На первом и третьем рабочих ходах цикла схема шлифования попутная, а на втором – встречная. Основное время обработки в цикле составляет 2,6 мин.

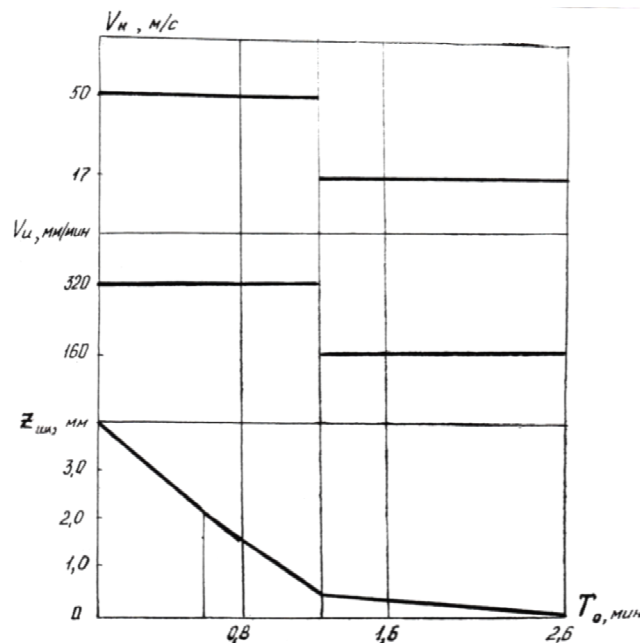


Рис. 2. Рабочий цикл глубинного шлифования паза

2. В тех случаях, когда к обработанным деталям предъявляются повышенные требования по точности размеров и геометрической форме, по качеству шлифованных поверхностей и, особенно, по неоднородности шероховатости, в разрабатываемом рабочем цикле на последней его стадии необходимо предусмотреть чистовой рабочий ход.

Так, например, для случая обработки паза с исходными данными предыдущего примера, но с более высокими требованиями по точности и качеству шлифованных поверхностей предлагается следующий рабочий цикл (рис. 3): первый рабочий ход – $v_k = 50$ м/с, $v_n = 320$ мм/мин, $t = 2,015$ мм; второй рабочий ход – $v_k = 50$ м/с, $v_n = 320$ мм/мин, $t = 2,00$ мм,

правка шлифовального круга на глубину 0,32 мм; третий рабочий ход (чистовой) – $v_k = 17 \text{ м/с}$, $v_{и} = 640 \text{ мм/мин}$, $t = 0,06 \text{ мм}$.

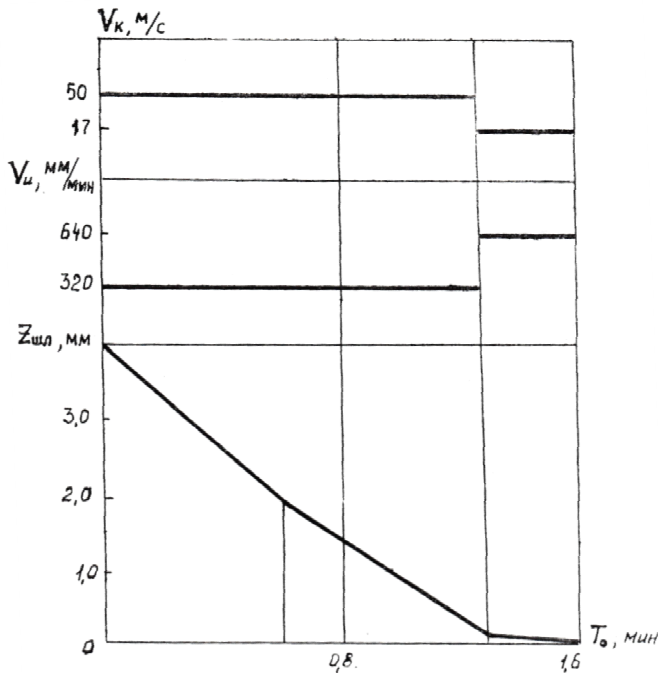


Рис. 3. Рабочий цикл глубинного шлифования пазов с чистовым рабочим ходом

Схемы шлифования на каждом рабочем ходе такие же, как и в предыдущем примере. При шлифовании пазов по разработанному циклу получены следующие параметры точности и качества обработанных поверхностей: глубина пазов – 4 Н7, ширина пазов – 10 Н8; радиус при пересечении дна пазов и его боковой стенки = 0,68 мкм, неоднородность шероховатости – $R_{max}/R_z = 1,1$; отсутствие структурных превращений в поверхностном слое металла шлифованного пазов. Основное время обработки в цикле составляет 1,6 мин.

Заключение

Применение высокоскоростного глубинного шлифования пазов в заготовках деталей машин, с использованием автоматических циклов изменения режимов обработки, позволяет отказаться от операций предварительного фрезерования, производить обработку с одной установки и на одном станке, что повышает точность обработки и ее производительность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. – СПб.: Лань, 2010. – 304 с.
2. Макаров, В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. – СПб.: Лань, 2013. – 320 с.
3. Поletaев, В.А., Волков, Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
4. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Суллова. – 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, 2010. – pp. 304.
2. Makarov, V.F. *Modern Methods of High-Performance Abrasion of Heat-Resistant Steel and Alloys*. – S-Pb.: Lan, 2013. – pp. 320.
3. Poletaev, V.A., Volkov, D.I. *Turbine Blade Deep Grinding: technologist's library*. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 272.
4. Technologist's reference book / under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2019. – pp. 800.

Рецензент д.т.н.
Владимир Федорович Макаров