

## Эффективность применения высокоструктурного инструмента при многокоординатном профильном шлифовании

### Effectiveness of highstructured tool at multycoordinate profile grinding

*Приведены результаты испытаний высокоструктурных шлифовальных кругов с повышенной пористостью на операциях многокоординатного автоматизированного шлифования деталей сложной пространственной формы. Установлено, что разработанный отечественный инструмент не уступает по своей эффективности лучшим зарубежным аналогам по работоспособности и позволяет снизить расход абразива дополнительно еще в 2 раза.*

*Test results of a high-structured grinding wheels with high porosity on the multi-axis grinding operations of parts of complex spatial forms. It is established that the domestic instrument is not inferior in efficiency to the best foreign analogues and its potential health can reduce the consumption of abrasive material in a further 2 times.*

**Ключевые слова:** абразивный инструмент, высокоструктурный, глубинное шлифование, пористость, профилирование, правка, структура, шлифование, шлифовальный круг.

**Keywords:** abrasive tools, high-structured, depth grinding, porosity, profiling, dressing, structure, grinding, grinding wheel.

#### Введение

В настоящее время для повышения производительности и качества обработки сложнофасонных деталей активно внедряется автоматизированная технология многокоординатного профильного шлифования [1, 2].

В новой технологии схема движений станка и количество одновременно работающих координат позволяют обработать все или большинство поверхностей детали сложной пространственной формы за одну ее установку на рабочем столе станка.

Комплексность обработки за счет максимальной концентрации технологических переходов достигается за счет:

— формообразования диаметральных и торцовых поверхностей детали при ее перемещении относительно рабочей поверхности шлифовального круга в 4–5 координатах;

— осуществления циклов маятникового глубинного шлифования с непрерывной правкой инструмента, в том числе криволинейных поверхностей с использованием линейной и круговой интерполяции.

У современных моделей профилишлифовальных станков зарубежных фирм Blohm, Elb-Schliff, Mдgerle и др., а также отечественной фирмы «Станковендт» эффективная реализация многокоординатного глубинного шлифования обеспечивается за счет наличия нескольких механизмов правки круга с возможностью смены позиции правящих алмазных роликов; многопозиционного магазина и механизмов автоматической замены шлифовальных кругов; адаптации системы охлаждения к переменным условиям шлифования по типоразмеру инструмента и его износу и др.

Технические возможности указанных станков позволяют загрузить свои инструментальные магазины шлифовальными кругами и правящими алмазными роликами, необходимыми по типоразмерам и характеристикам для выполнения комплексной обработки детали.

Эффективность такой обработки безусловно связана с надежностью всего комплекта задействованного инструмента и оптимального назначения параметров режима шлифования и правки для каждой рабочей позиции. И очевидно, что наиболее слабым элементом технологической системы шлифования оста-

ется шлифовальный круг. Проблема обеспечения его гарантированной работоспособности и ресурса в условиях автоматизированной обработки деталей сложной формы только усугубляется.

До недавнего времени профилишлифовальные станки отечественных и зарубежных моделей оснащались преимущественно импортными кругами. Для комплексной обработки, например блоков сопловых лопаток газотурбинного двигателя из жаропрочного никелевого сплава на станке мод. MFP-050.65.65 фирмы Mдgerle (Швейцария), используются специальные шлифовальные круги с повышенной структурностью диаметром 300 мм и с высотой от 15 до 50 мм. В комплект загрузки инструментального магазина станка входят круги производства фирмы Tyrolit (Австрия) с характеристиками SU33AG02GG11VB140, SU33A702GG11VB140, SU33F602HH10VK8, 89A60219AV55P23 и др.

### Результаты исследований

Для разработки аналогов импортного инструмента для специфичных условий автоматизированного профильного шлифования была проведена исследовательская работа. Целью ее была не идентификация составов австрийских кругов и их воспроизведение на отечественном предприятии, а подбор характеристик и составов, которые были бы адекватны физическим условиям шлифования на конкретном технологическом переходе. Специфика шлифования деталей из жаропрочных сплавов на никелевой основе и основы формирования рецептурных составов абразивных инструментов с повышенной структурностью и пористостью изложены, например, в работах [3, 4, 5, 10].

Особенностью высокоструктурного абразивного инструмента является то, что за счет уменьшения количества абразивных зерен (в нашем примере объемное содержание абразива снижается с 42—40 до 34—36 %) увеличиваются расстояния между ними, обеспечивается более равномерное их распределение в объеме с уменьшением риска сегрегации и образования конгломератов. В итоге формируется более однородная объемная структура ключевых компонентов шлифовального круга «зерно-связка», что гарантирует стабильную прочность их связи и соответственно твердость по объему круга, уменьшение нестабильности масс (дисбаланс), повышение разрывной прочности и др. [3, 6].

Повышение номера структуры шлифовального круга позволяет нивелировать влияние твердости на термодинамические условия процесса шлифования: инструмент с повышенной твердостью при высоких номерах структуры работает как более мягкий, гарантируя износостойкость и отсутствие прижогов на обработанной поверхности детали [5].

Для достаточно сложных физических условий профильного шлифования деталей из никелевых сплавов с переменными параметрами обработки и правки были разработаны круги оригинального состава с характеристиками 25AF60G14V и 25AF60H13V. За счет повышения их номера структуры до 13—14 (у кругов фирмы Tyrolit номер структуры 10—11) и соответственно расширения их технологических возможностей удалось сократить потребность в необходимых характеристиках кругов в 2 раза.

Для оценки работоспособности новых отечественных кругов были проведены на двух заводах их производственные испытания. Круги по заявкам заводов были изготовлены по технологии МГТУ «СТАНКИН» на ООО «ВОЛГАШЛИФ ПЛЮС» и испытаны при шлифовании блоков сопловых лопаток из никелевого сплава марки ЖС6У-ВИ на станке с ЧПУ мод. MFP-050.65.65.

Комплексная обработка выполнялась на режимах шлифования и непрерывной правки кругов, которые были рекомендованы и отлажены на станках зарубежными специалистами применительно к инструменту различных типоразмеров и характеристик фирмы Tyrolit. Указанные режимы, возможно, были привязаны к конкретной детали и были постоянными при ее обработке.

На одном станке деталь шлифовалась при скорости круга 22 м/с на черновых и получистовых проходах и 27 м/с на финишном проходе. Скорость перемещения детали была постоянной и равной 500 мм/мин, а глубина резания варьировалась в диапазоне от 1,5 до 0,1 мм с чистовым проходом в 0,05 мм. Принудительная непрерывная правка кругов на всех промежуточных проходах выполнялась алмазным роликом с радиальной подачей 0,6 мкм/об.кр. при соотношении скоростей алмазного ролика и шлифовального круга, равным 0,8. Заключительный проход осуществлялся без правки.

На другом станке скорость испытанных кругов была постоянной — 20 м/с при постоянной скорости перемещения детали, равной 300 мм/мин. Глубина резания на проходах изменялась от 1,5 до 0,04 мм, а на чистовом проходе составляла 0,02 мм. Радиальная подача непрерывной правки алмазным роликом во всех случаях была также постоянной, но равной 0,8 мкм/об.кр. при аналогичном соотношении скоростей ролика и круга 0,8.

На обоих станках использовалась смазочно-охлаждающая эмульсия BlasocutBC 53LFSM, которая подавалась в зону обработки под давлением 1,2 МПа с расходом 200 л/мин и на очистку рабочей поверхности круга под давлением 1,6 МПа с расходом 100 л/мин.

Работоспособность нового отечественного инструмента и кругов фирмы Tyrolit сравнивалась по мощности шлифования, точности полученного про-

филя обработанных поверхностей детали, шероховатости, наличию прижогов, микротрещин и других возможных дефектов шлифовочного характера.

При шлифовании максимальная нагрузка на приводе главного движения отечественными кругами и импортным инструментом во всех случаях была идентичной: на одном станке она не превышала 6 %, на другом — не более 10–12 %.

Двукратная разница в динамике шлифования двух испытанных вариантов ожидаема: при увеличении скорости детали почти в 1,7 раза при уменьшенной на 30 % подачи правки существенно возрастает мощность съема материала. А наблюдаемое незначительное при этом повышение скорости круга на 10 % практически не влияет на толщину срезаемой стружки и, следовательно, на силу и мощность резания. С точки зрения экспериментальной оценки работоспособности круга фактор повышения термодинамической нагрузки на него можно рассматривать как полезный.

По результатам контроля деталей после шлифования было установлено, что точность профиля и шероховатость обработанной поверхности соответствовала заданным техническим требованиям. При проведении капиллярно-люминесцентного контроля прибором ЛЮМ1-ОВ на одном заводе и капиллярным контролем прибором ЦМ-15 на другом заводе микротрещин и других дефектов на деталях, обработанных отечественным кругом, не обнаружено.

Проведенный объем испытаний высокоструктурных шлифовальных кругов, изготовленных на ООО «ВОЛГАШЛИФ ПЛЮС», по количеству использованных кругов — 16 шт. и обработанных деталей сложного профиля из труднообрабатываемого никелевого сплава — 31 комплект, и полученные положительные результаты дают основание заключить, что они по своей работоспособности, производительности, точности и качеству обработки на данной операции идентичны шлифовальным кругам производства австрийской фирмы Tyrolit. Этот вывод получен в результате сравнительных испытаний кругов в одинаковых условиях шлифования.

#### Анализ полученных результатов

Из опыта применения высокоструктурных кругов с повышенной пористостью, изготовленных по технологии МГТУ «СТАНКИН» [9], известно, что заложенный в них резерв работоспособности позволяет без ущерба для точности и качества обработки формировать режим шлифования с повышением производительности до 40 % и сократить затраты на абразив более чем в 5 раз в сравнении с зарубежными аналогами фирмы Tyrolit и израильской фирмы CGW [4, 8, 9].

Указанные возможности отечественного высокоструктурного инструмента были выявлены в

результате их производственных испытаний при профильном глубинном шлифовании хвостовиков турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов. В примере испытаний, который приведен выше, анализировался процесс многокоординатного профильного шлифования блока сопловых лопаток из жаропрочных никелевых сплавов. Операция формообразования елочного профиля выполняется за три перехода с переменными режимами шлифования и непрерывной правки круга на каждом из них.

В примере многокоординатного профильного шлифования блока сопловых лопаток, когда сконцентрировано большое количество проходов кругов с обработкой различных поверхностей детали, режим шлифования и правки принят фактически постоянным. В этой связи можно оценить условия процесса шлифования с точки зрения его экономической эффективности.

Технологическая себестоимость операции шлифования и стоимость инструментального обеспечения обусловлены затратами на абразив. Расход абразива в результате уменьшения диаметра шлифовального круга  $D$  на один цикл обработки поверхности детали длиной  $l_d$  пропорционален величине радиальной подачи непрерывной правки алмазными роликом  $S_p$  и скорости круга  $V_{кр}$  и обратно пропорционален скорости перемещения детали  $V_d$  [9]:

$$\delta_D = \frac{120}{\pi} \cdot \frac{S_p V_{кр}}{V_d} \cdot \frac{l_d}{D} \quad (1)$$

Если не учитывать в формуле (1) длину обработки  $l_d$ , то получаем универсальную оценку экономичности шлифования через интенсивность расхода инструмента на 1 мм длины обработки. По сути величина интенсивности расхода инструмента количественно определяет оптимальность режима через возможный максимум скорости съема материала при минимальном расходе абразива.

Сравнение двух режимов обработки и правки в испытанных вариантах многокоординатного профильного шлифования показывает, что в соответствии с (1) интенсивность расхода инструмента в варианте с  $V_d = 500$  мм/мин,  $S_p = 0,6$  мкм/об.кр. и  $V_{кр} = 22$  м/с оказывается в 2 раза меньше, чем в варианте, где скорости детали и круга были меньше, а подача правки — больше.

Важно, что принятая скорость перемещения детали  $V_d$  и радиальная подача правки  $S_p$  во всех вариантах являются постоянными и не зависят от глубины шлифования, которая изменялась от 1,5 до 0,04 ÷ 0,1 мм на проходах с правкой круга или до 15 ÷ 37,5 раз.

Если при назначении  $V_d$  учитывать фактическую глубину резания на проход, то реально повысить скорость детали до 40 %, а подачу правки уменьшить до 50 %. В совокупности это обеспечит допол-

нительное снижение интенсивности расхода инструмента еще в 2,1 раза в сравнении с лучшим вариантом обработки.

Выполненные расчеты показывают, насколько чувствительна экономика шлифования с непрерывной правкой круга к практическим условиям его реализации, и в том числе, с использованием нового перспективного инструмента. За счет разницы в стоимости отечественного и импортного инструмента затраты на него при эксплуатации станка в течение года снижаются не менее чем на 4 млн рублей. Если привести дополнительную оптимизацию параметров режима шлифования и правки по проходам, то затраты на инструментальное обеспечение станка при многокоординатном профильном шлифовании могут быть уменьшены еще в 2 раза.

### Заключение

Высокоструктурные шлифовальные круги с повышенной пористостью могут эффективно использоваться на операциях автоматизированного многокоординатного профильного шлифования деталей сложной формы. Они являются экономичной альтернативой импортному инструменту, обеспечивая все необходимые требования по производительности, точности и качеству обработки.

Установлено, что в случае оптимизации параметров шлифования и правки круга по проходам с учетом переменной глубины обработки возможно дополнительное снижение расхода абразивного инструмента до 2 и более раз.

### Библиографический список

1. **Полетаев В.А.** Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 2006. — 256 с.

2. **Технология** автоматизированной комплексной обработки лопаток турбин методами высокопроизводительного шлифования, многоцелевые шлифовальные станки и высокоструктурный абразивный инструмент для ее реализации / В.А. Полетаев, В.К. Старков, В.Н. Крылов, С.А. Рябцев и др.; под. ред. В.А. Полетаева, В.К. Старкова. — М.: Машиностроение. 2013. — 122 с.

3. **Старков В.К.** Шлифование высокопористыми кругами. — М.: Машиностроение. 2007. — 688 с.

4. **Профильное** глубинное шлифование хвостовиков турбинных лопаток инструментом отечественных и зарубежных производителей / В.К. Старков, С.А. Рябцев, Н.А. Горин и др. // Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 10. С. 28—32.

5. **Старков В.К.** Высокопористый абразивный инструмент нового поколения // Вестник машиностроения. 2002. № 4. С.56—62.

6. **Высокоструктурные** шлифовальные круги и их эффективное применение / В.К. Старков, С.А. Рябцев, С.В. Костров и др.; под. ред. В.К. Старкова. — М.: МГТУ «Станкин». 2013. — 213 с.

7. **Старков В.К.** Теоретические и технико-экономические предпосылки профильного глубинного шлифования с непрерывной правкой круга // Вестник машиностроения. 2010. № 12. С. 39—43.

8. **Технологические** процессы механической и физико-механической обработки в авиадвигателестроении: учеб. пособие. / под общ. ред. В.Ф. Безъязычного. — М.: Машиностроение, 2001. — 290 с.

9. **Григорьев С.Н.** Кадровое обеспечение российского машиностроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2009. № 1. С. 5—8.

10. **Справочник** конструктора-инструментальщика / под ред. В.А. Гречишниковой и С.В. Кирсанова. — М.: Машиностроение, 2006. — 542 с.

**Старков Виктор Константинович** — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра «Новые технологии и инструменты» МГТУ «СТАНКИН».

**Рябцев Сергей Александрович** — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Новые технологии и инструменты» МГТУ «СТАНКИН».

**Starkov Victor Konstantinovich** — D. Sc. in Engineering, Professor, chief researcher of scientific-research center «New technologies and tools» of MSTU «STANKIN».

**Ryabtsev Sergey Aleksandrovich** — D. Sc. in Engineering, leading researcher of the research centre «New technologies and tools» of MSTU «STANKIN».