

В. Ф. Макаров, А. Х. Сакаев

## ПРОФИЛЬНОЕ ГЛУБИННОЕ ШЛИФОВАНИЕ ЛОПАТОК ТУРБИН НА СТАНКЕ С ЧПУ С НЕПРЕРЫВНОЙ ПРАВКОЙ КРУГА

Приведены результаты сравнительных исследований процессов обработки профильных поверхностей бандажных полок турбинных лопаток методом круглого врезного шлифования на модернизированном токарно-лобовом станке МК153М и методом глубинного шлифования на станке с ЧПУ. Доказано, что применение глубинного шлифования приводит к значительному улучшению качества поверхностного слоя лопаток, повышает производительность и культуру труда. *Профильное шлифование; лопатки турбин*

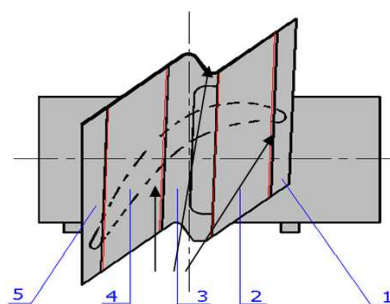
### ВВЕДЕНИЕ

Значительные проблемы на моторостроительных предприятиях возникают при обработке профильных наружных поверхностей бандажных полок турбинных лопаток газотурбинных двигателей. В качестве обрабатываемых материалов для турбинных лопаток применяются весьма труднообрабатываемые жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе типа ЖС6УВИ, ЖС26, ЖС32, ЧС7УВИ и др. Известно, что высокоэффективная механическая обработка этих сплавов лезвийным инструментом невозможна. Для обработки наиболее эффективен только абразивный инструмент. Трудность обработки также связана с тем, что полки лопаток турбин имеют радиусные поверхности и несколько сложных профильных глубоких канавок с небольшими радиусами сопряжений (рис. 1).

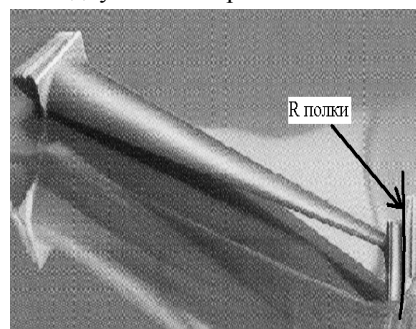
Кроме того, профильные поверхности канавок полок подразделяются на криволинейные выпуклые, криволинейные вогнутые, конические выпуклые, конические вогнутые и плоские поверхности.

### АНАЛИЗ ТИПОВОГО ТЕХПРОЦЕССА

Для обработки профильных радиусных полок лабиринтов лопаток турбин чаще всего применяют модернизированные токарно-лобовые станки модели МК163М. На салазках станка устанавливается шлифовальная головка, а лопатки по 30–40 штук собираются в специальное роторное приспособление, закрепленное на планшайбе шпинделя станка для шлифования одновременно всего комплекта лопаток.



Радиусные поверхности полки



Лопатка турбины с радиусной бандажной полкой

**Рис. 1.** Общий вид радиусных поверхностей полок турбинной лопатки газотурбинного двигателя ПС90 А

При шлифовании применяются несколько типоразмеров шлифовальных кругов диаметром 150–200 мм для последовательной обработки торцов и периферии профиля бандажной полки лопатки. Профиль бандажной полки формируется путем врезного и круглого шлифования большой номенклатурой кругов на бакелитовой и вулканитовой связке:

250×4×32 25A50НСТ1...СТЗБУ;  
250×4,5×32 25A40...25Н СТВ;  
12-150×16×32 5A40...25НСМ2...СТ1К +  
+ пропитка бакелитом;  
11-125×45×32 25A40...25НСМ2...СТ1К +  
+ пропитка бакелитом.

Правка кругов по радиусам и торцам проводится вручную с помощью кусочков абразивного круга из карбида кремния черного высокой твердости (ВТ).

При обработке лопаток на токарно-лобовом станке постоянно возникают серьезные проблемы обеспечения требуемого качества поверхностного слоя и точности геометрии профильных поверхностей. При этом исключается применение охлаждающей жидкости, что часто приводит к образованию шлифовочных дефектов в виде прижогов и трещин. Кроме этого, ввиду частой смены шлифовальных кругов, их правки и постоянного контроля точности каждой поверхности полки, существенно возрастает вспомогательное время операции.

Большая трудоемкость и сложность выполнения данной операции в ручном режиме управления станком требуют использования рабочих высокой квалификации. Но при этом не соблюдаются экологические нормы, поскольку зона шлифования не закрыта и абразивная пыль поступает в окружающую среду. Рабочий находится постоянно в напряженном состоянии в неблагоприятных санитарно-гигиенических условиях: абразивная пыль, шум, вибрации. Проблемы еще более усугубляются неудовлетворительной работой применяемых шлифовальных кругов. Твердые круги быстро засаливаются, а мягкие круги быстро осыпаются. Бакелитовая связка кругов размягчается при температурах более 300 °С. Существует опасность разрыва круга, что может привести к угрозе жизнедеятельности рабочего персонала. Применение большей зернистости кругов для снижения прижогов приводит к увеличению шероховатости поверхности.

### НОВЫЙ МЕТОД ШЛИФОВАНИЯ

Для решения этих проблем с целью повышения производительности, качества, точности и культуры производства на ОАО «Пермский моторный завод» совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ПНИПУ разработан новый технологический метод многокоординатного глубинного шлифования профильных поверхностей бандажных полок лопаток турбин высокопористыми кругами на специальных одношпиндельных станках-полуавтоматах с ЧПУ мод. Micro Cut 4 250-S840D фирмы ELB-Schleiff (Германия). Разработанная технология предусматривает шлифование профильных радиусных поверхностей бандажных полок лопаток из сплава ЖСБУВИ по периферии и торцам мето-

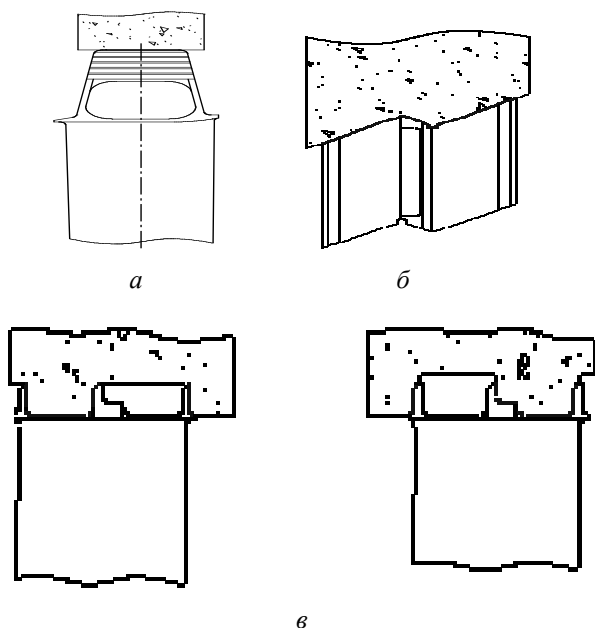
дом профильного врезания по схемам представленным на рис. 2. Шлифование профильных канавок и гребешков бандажных полок лопаток турбин проводится по одной лопатке, устанавливаемой в специальное приспособление, за одну установку в 4–5 проходов в зависимости от величины снимаемого припуска. При этом глубина резания на первом черновом проходе может составлять от 1,5 до 3,5 мм, скорость шлифования – 20 м/с, а скорость рабочей подачи стола с заготовкой – от 50 до 800 мм/мин.

Процесс шлифования полностью автоматизирован и проходит при автоматической балансировке и попутной непрерывной правке профиля круга с величиной врезания правящего алмазного ролика 0,2 мм. Компактная установка с CNC управлением и подвижной стойкой позволяет свободно программировать непрерывную правку шлифовального круга алмазным роликом. При этом система ЧПУ учитывает фактический износ круга и позволяет проводить интерполяционное шлифование по любой заданной профильной линии. Радиусная поверхность полок формируется путем интерполирования перемещения шлифовального круга системой ЧПУ при неподвижном столе с деталью и продольном перемещении стойки станка. Точность профиля бандажной полки обеспечивается точностью профиля алмазного правящего ролика.

Процесс шлифования полностью автоматизирован и проходит при автоматической балансировке и попутной непрерывной правке профиля круга с величиной врезания правящего алмазного ролика 0,2 мм. Компактная установка с CNC управлением и подвижной стойкой позволяет свободно программировать непрерывную правку шлифовального круга алмазным роликом. При этом система ЧПУ учитывает фактический износ круга и позволяет проводить интерполяционное шлифование по любой заданной профильной линии. Радиусная поверхность полок формируется путем интерполирования перемещения шлифовального круга системой ЧПУ при неподвижном столе с деталью и продольном перемещении стойки станка. Точность профиля бандажной полки обеспечивается точностью профиля алмазного правящего ролика.

Для эффективного охлаждения зоны шлифования предусмотрена подача СОЖ по профильным направляющим под давлением 12 атм. Очистка круга от засаливания производится непрерывно с помощью СОЖ с периферии и торца

через три сопла под давлением 14 атм. Тонкая очистка СОЖ осуществляется с помощью ленточного бумажного фильтра.



**Рис. 2.** Схемы глубинного шлифования различных поверхностей рабочих лопаток турбин ГТД на станке мод. MicroCut 4

Система ЧПУ станка осуществляет непрерывную правку круга с контролем его диаметра и обеспечением постоянной скорости шлифования. Приведенные характеристики нового процесса глубинного шлифования, анализ технической литературы [1, 2] позволяют с уверенностью утверждать о безусловном улучшении качества поверхностного слоя деталей при использовании нового метода обработки. Однако для проверки этого утверждения необходимо провести тщательные исследования влияния условий и режимов шлифования на формирование основных параметров качества поверхностного слоя деталей.

#### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В результате предварительного исследования нового процесса установлено, что профильную обработку поверхностей полок лопаток наиболее рационально проводить за пять проходов. Такая обработка является оптимальной как с точки зрения производительности, так и с точки зрения формирования поверхностного слоя требуемого качества. Определены следующие рациональные режимы глубинного шлифования (см. таблицу).

#### Режимы глубинного шлифования

№ прохода	Глубина резания, мм	Установка круга, мм	Скорость круга, $V_{кр}$ , м/с	Скорость детали, $V_d$ , мм/мин	Подача ролика, $S_p$ , мкм/об. круга,	Фактор, К
1	~7	2,55	20	100	0,2	-0,8
2	1	1,55	20	150	0,2	-0,8
3	1	0,55	20	150	0,2	-0,8
4	0,5	0,05	20	200	0,2	-0,8

Примечание: шлифовальный круг: 400x37x127 F13A 70 FF21 V(STRATO) фирмы TYROLIT (Австрия). Бумага фильтровальная MO22055-1,4% эмульсия ELB-ISOGRIND 130EP. Автоматическая балансировка и попутная правка круга.

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Ввиду того, что качество поверхностного слоя деталей, полученное на финишной операции, значительно влияет на эксплуатационные показатели изделия, изучение процесса образования поверхностного слоя и взаимосвязи с технологическими факторами процесса шлифования, с одной стороны, и эксплуатационными показателями – с другой, имеет большое значение для прогнозирования качества деталей при обработке. Исследования качества поверхностного слоя различных поверхностей полок турбинных лопаток из жаропрочного сплава на никелевой основе ЧС7УВИ проводились на вырезанных из полок лопаток электроэрозионным методом образцах путем сравнения шероховатости, остаточных напряжений, наклепа и микроструктуры, полученных при старой и новой технологии.

#### Шероховатость

Шероховатость поверхности образцов измерялась на приборе МИС 11 – двойном микроскопе Линника ввиду малой величины измеряемой площадки. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что шероховатость обработанного торца бандажной полки турбинной лопатки на станке Micro Cut 4 уменьшилась и составляет  $Ra = 0,64-0,81$  мкм. Обработка на токарно-лобовом станке МК163М обеспечивает шероховатость поверхности в пределах  $Ra = 1,06-1,25$  мкм.

Такое снижение шероховатости объясняется применением при глубинном шлифовании кругов с высокопористой структурой и оптимальной твердостью. Высокопористые круги обладают хорошей самозатачиваемостью и меньшей засаливаемостью. Кроме того, уменьшение шероховатости при обработке на станке Micro Cut 4 происходит за счет высоконапорной подачи СОЖ в зону шлифования, в то время как на токарно-лобовом станке МК163М обработка фасонных поверхностей идет всухую. При подаче СОЖ складывается благоприятная гидроаэродинамическая обстановка и, как следствие, после правки с подачей СОЖ круг имеет более развитый рельеф, т. е. большую режущую способность. Кроме того, на шероховатость обработанной поверхности влияют техника подачи СОЖ и ее концентрация. Уменьшение шероховатости также объясняется разбиением операционного припуска на проходы. Считается, что в случае многопроходного шлифования легче обеспечить требуемые характеристики точности и шероховатости обработанной поверхности. Все параметры качества достигаются на заключительных чистовых ходах, когда глубина резания минимальна.

При анализе кинематики процесса глубинного шлифования торцевых и периферийных поверхностей установлено, что при торцевом шлифовании длина дуги контакта абразивного круга с обрабатываемой поверхностью больше, чем при шлифовании периферии. В результате этого увеличивается количество режущих кромок, одновременно участвующих в работе шлифования и, следовательно, образуется большое количество шлама и стружки, выброс которых из зоны шлифования затруднен, т. е. повышается опасность появления отдельных глубоких рисок на обработанной поверхности. Отсюда следует, что шероховатость на торцевой поверхности больше, чем шероховатость на периферийной поверхности (рис. 3).

При повышенных требованиях к шероховатости поверхности детали на последнем рабочем ходе правка не назначается. Это происходит по следующей причине: правящий ролик, имеющий алмазы размером 400–500 мкм правит методом врезания и поэтому оставляет следы на шлифовальном круге, которые копируются на обработанной поверхности детали. Таким образом, правка не всегда благоприятно сказывается на качестве поверхностного слоя. Из проведенных исследований следует, что глубинное шлифование с непрерывной правкой кругов на но-

вом оборудовании и применение высокопористых кругов позволяет стабильно получать значения шероховатости  $Ra = 0,6–0,8$  мкм, что меньше требуемых ( $Ra \leq 1,25$  мкм) по ТУ технологии.

### Остаточные напряжения

Сравнительное исследование остаточных напряжений проводилось на образцах, вырезанных электроэрозионным методом из торцевых и периферийных поверхностей полков методом Н. Н. Давиденкова на приборе ПИОН-2. В качестве примера на рис. 4 и 5 приведены результаты исследования влияния метода обработки на характер распределения остаточных напряжений наторцевой и периферийной поверхностях обработанной полки лопатки из сплава ЧС7ВИ.

При анализе представленных эпюр и характера формирования и распределения остаточных напряжений 1-го рода можно выделить три фактора, оказывающих основное влияние на форму эпюры остаточных напряжений: неравномерная пластическая деформация поверхностного слоя под действием сил резания абразивного зерна; упругопластические деформации, обусловленные тепловым расширением металла в поверхностном слое при его нагреве от тепловыделения при резании; структурно-фазовые превращения металла при нагреве и охлаждении поверхностного слоя.

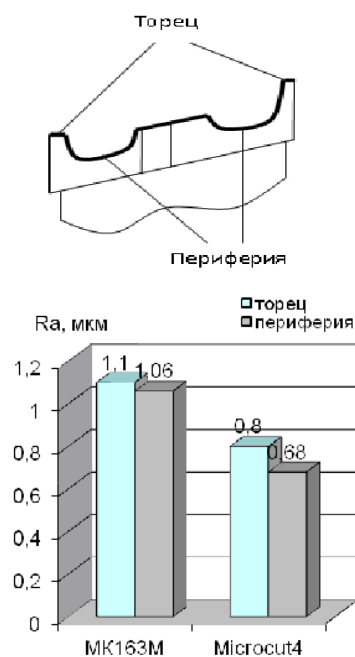
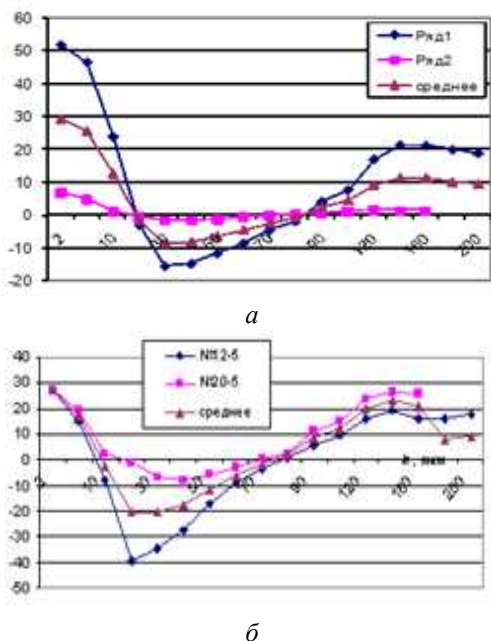


Рис. 3. Влияние метода обработки на шероховатость торцевых и периферийных поверхностей полков турбинных лопаток



**Рис. 4.** Характер распределения остаточных напряжений  $\sigma$  по глубине поверхностного слоя  $h$  при обработке левого торца полки лопатки турбины на токарно-лобовом станке МК163М (а) и станке фирмы «ElbSchliff» мод. Micro Cut 4(б)

В результате анализа распределения эпюр остаточных напряжений установлено, что обработка торцевых поверхностей бандажных полок турбинных лопаток на токарно-лобовом станке МК163М (см. рис. 4, а) сопровождается появлением как остаточных напряжений сжатия до  $-15,7 \text{ кг/мм}^2$  на глубине 50 мкм, так и растягивающих напряжений до  $+51,6 \text{ кг/мм}^2$  на поверхности глубиной до 10 мкм. В поверхностном слое глубиной до 50 мкм образуются остаточные напряжения растяжения  $+23,8 \dots +51,6 \text{ кг/мм}^2$ . На глубине от 30 до 80 мкм растягивающие напряжения переходят в напряжения сжатия от  $-3,3$  до  $-15,7 \text{ кг/мм}^2$ .

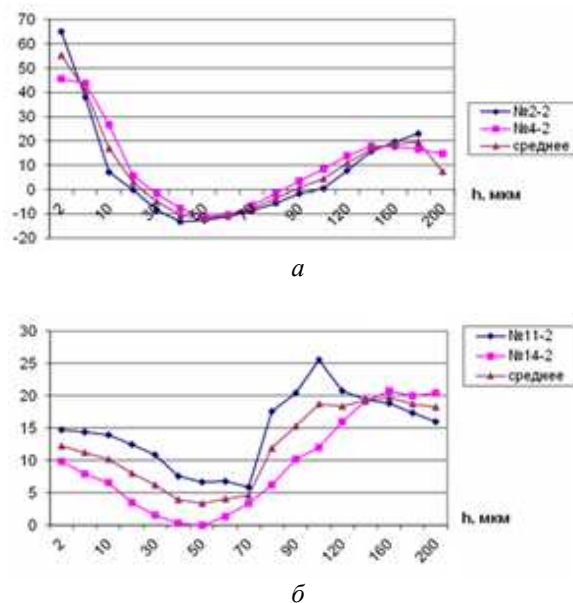
Процесс шлифования полностью автоматизирован и проходит при автоматической балансировке и попутной непрерывной правке профиля круга с величиной врезания правящего алмазного ролика 0,2 мм. Компактная установка с CNC управлением и подвижной стойкой позволяет свободно программировать непрерывную правку шлифовального круга алмазным роликом. При этом система ЧПУ учитывает фактический износ круга и позволяет проводить интерполяционное шлифование по любой заданной профильной линии.

Радиусная поверхность полок формируется путем интерполирования перемещения шлифо-

вального круга системой ЧПУ при неподвижном столе с деталью и продольном перемещении стойки станка. Точность профиля бандажной полки обеспечивается точностью профиля алмазного правящего ролика.

Применение новой технологии многокоординатного глубинного шлифования приводит к увеличению остаточных напряжений сжатия на торцевых поверхностях до  $39,8 \text{ кг/мм}^2$  на глубине 10–70 мкм и уменьшению растягивающих напряжений до  $27,6 \text{ кг/мм}^2$  на поверхности глубиной до 10 мкм (рис. 4, б).

При обработке периферийных поверхностей полок лопаток на графиках видно, что наибольшие растягивающие напряжения до  $+65,1 \text{ кг/мм}^2$  обнаружены на поверхности глубиной до 10 мкм после шлифования на токарно-лобовом станке (рис. 5, а). Применение глубинного шлифования уменьшает растягивающие напряжения на поверхности в три раза, до  $+20,7 \text{ кг/мм}^2$  (рис. 5, б). Распределение остаточных напряжений носит при этом более благоприятный характер с позиции повышения усталостной прочности.



**Рис. 5.** Характер распределения остаточных напряжений  $\sigma$  по глубине слоя  $h$  при обработке правой периферийной части полки лопатки турбины на плоскошлифовальном станке фирмы «ElbSchliff» мод. Micro Cut 4

### Наклеп

Исследование характера распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя образцов проводилась методом косых

шлифов с использованием микротвердомера ПМТ 3. Исследовались образцы, вырезанные из торцевых и периферийных поверхностей полок. Оценивалась глубина и степень наклепа при различных методах профильного шлифования полок.

В результате анализа полученных данных и графиков на рис. 5 установлено, что при применении серийного метода обработки торцевых поверхностей полок лопаток турбин глубина наклепа составляет 20 мкм, а степень наклепа составляет 35,2 %. При шлифовании глубинным методом глубина наклепа торцевых поверхностей снижается в два раза и составляет 10 мкм, степень наклепа снижается до 20 %, т. е. происходит снижение степени наклепа на 15 %.

При обработке периферийных поверхностей полок турбинных лопаток замена метода обработки привела к уменьшению глубины наклепа  $h$  с 30 мкм до 10 мкм, т. е. в три раза, а степень наклепа  $N$  уменьшилась с 44,4 % до 32 %, т. е. в среднем на 12 %. Снижение микротвердости при применении новой внедряемой технологической схемы обработки полок турбинных лопаток на станке Micro Cut 4 объясняется тем, что используется непрерывная правка круга, при которой удаляются затупившиеся и засаленные зерна, и режущая способность инструмента повышается, а также применяется высоконапорная подача СОЖ для охлаждения и смыва накопившихся в крупных порах круга стружки и шлама.

Таким образом, глубинное шлифование с непрерывной правкой высокопористых кругов на новом оборудовании способствует снижению поверхностного упрочнения деталей по сравнению с серийной обработкой полок турбинных лопаток на токарно-лобовом станке МК163М. Это оказывает благоприятное воздействие на поверхностный слой, поскольку известно, что повышенный наклеп отрицательно сказывается на работоспособности деталей, в эксплуатации при весьма высоких температурах 800–1200°C.

### Микроструктура

Исследование микроструктуры проводилось на образцах, вырезанных из торцов и периферийных частей бандажных полок турбинных лопаток. Образцы заливались в специальную форму, торец образца полировался и подвергался травлению в специальном растворе для изучения микроструктуры. На микроструктурном микроскопе НЕОРНОТ 32 при увеличении  $\times 500$

анализировалась и сравнивалась микроструктура поверхностного слоя лопаток турбин, обработанных на токарном и плоскошлифовальном станках.

В результате анализа микрошлифов установлено, что на образцах из торцевой и периферийной части полок лопаток турбин, обработанных на станке МК163М, поверхность рваная, неровная. На образцах имеются выкрашивания по карбидам а также растрескивание по карбидам. На поверхности обработанных полок на станке МК163М наблюдается нагартованный и рекристаллизованный слой на глубину 0,02 мм. Обнаруженные изменения в микроструктуре поверхностных слоев связаны со значительной пластической деформацией и тепловым разогревом при шлифовании без охлаждения засаленными кругами и заключаются в дополнительном термическом старении и рекристаллизации материала.

Поверхность образцов, вырезанных из полок лопаток, обработанных методом глубинного шлифования на станке Micro Cut 4, ровная, без надрывов. Изменений в микроструктуре и поверхности не наблюдается. Нагартованного слоя, выкрашивания по карбидам не обнаружено. Микроструктура всех исследованных образцов удовлетворительная для термообработано-госплава ЧС7-ВИ и представляет собой твердый раствор  $+\gamma$ -фаза + карбиды.

Таким образом, сравнительный анализ влияния метода обработки полок лопаток турбин на характер микроструктуры поверхностного слоя показал, что применение процесса глубинного шлифования не ухудшает структурно-фазового состояния поверхностного слоя деталей, а в некоторых случаях даже способствует улучшению по сравнению с шлифованием по традиционной технологической схеме.

### Трещины

Исследования по выявлению трещин методом ЛЮМ-контроля показали, что на полках, обработанных на токарно-лобовом станке МК 163М, имеются микротрещины. После обработки методом глубинного шлифования на плоско-шлифовальном станке Micro Cut 4 в поверхностном слое бандажных полок турбинных лопаток трещин и других дефектов такого вида не обнаружено.

### ВЫВОДЫ

Поверхностный слой деталей после обработки методом многокоординатного глубинного шлифования (МГШ) имеет более высокие показатели основных параметров качества поверхностного слоя по сравнению с показателями, полученными после обработки на токарно-лобовых станках. Применение нового метода шлифования (МГШ) стабильно обеспечивает:

- снижение шероховатости с  $Ra = 1,06 \dots 1,25$  мкм до  $Ra = 0,63 \dots 0,8$  мкм;
- уменьшение растягивающие напряжений на поверхности в два-три раза, например, на периферийных поверхностях полки с  $+65,1$  кг/мм<sup>2</sup> до  $+20,7$  кг/мм<sup>2</sup>;
- снижение глубины наклепа в два-три раза и степени наклепа на 13–15%;
- способствует улучшению структурно-фазового состояния поверхностного слоя;
- снижает вероятность появления микротрещин в поверхностном слое полок лопаток.

Полученные положительные данные процесса МГШ по качеству поверхностного слоя позволили получить разрешение на внедрение

новой технологии в производство. В результате проведенных исследований внедрена обработка 11 наименований лопаток турбины. Внедрение новой технологии шлифования бандажных полок турбинных лопаток позволило значительно сократить время обработки, улучшить качество и стабильность точностных параметров, облегчить и значительно повысить культуру и интеллектуальность труда рабочих.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
2. Полетаев В. А., Волков Д. И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.

### ОБ АВТОРАХ

**Макаров Владимир Федорович**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии машиностроения Пермск. нац. иссл. политехн. ун-та.

**Сакаев Альберт Халилович**, асп., нач. лаб. шлифования и отделочных работ ОАО «Пермский моторный завод».