

УДК 621.923.1

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ШЛИФОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК ТУРБИН НА МНОГООСЕВЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

В. Ф. МАКАРОВ<sup>1</sup>, А. Х. САКАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>makarovv@pstu.ru, <sup>2</sup>Sakaev\_Albert@mail.ru

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

<sup>2</sup>ОАО «Пермский моторный завод»

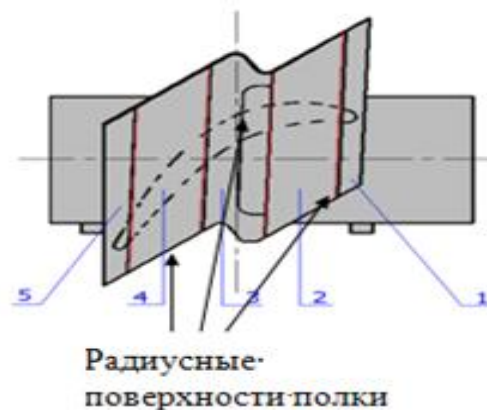
*Поступила в редакцию 22.07.2013*

**Аннотация.** Приведены результаты исследования глубинного шлифования профильных поверхностей бандажных полок лопаток турбин высокопористыми кругами на специальных многоосевых станках-полуавтоматах с ЧПУ. Установлено, что поверхностный слой деталей после обработки методом многокоординатного глубинного шлифования имеет более высокие показатели основных параметров качества поверхностного слоя по сравнению с показателями, полученными после обработки на токарных станках.

**Ключевые слова:** шлифовальный круг; глубина шлифовального профиля; редактирование; абразивный инструмент; шлифовальный станок.

При обработке радиусных профильных поверхностей бандажных полок турбинных лопаток на многих предприятиях моторостроения традиционно применяется шлифование в роторных приспособлениях на модернизированных токарно-лобовых станках мод. МК163М. В качестве обрабатываемых материалов для турбинных лопаток применяются весьма труднообрабатываемые жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе типа ЖС6УВИ, ЖС26, ЖС32, ЧС7УВИ и др., поэтому применение других методов, кроме шлифования, оказалось невозможно. Трудность обработки также связана с тем, что полки лопаток турбин имеют радиусные поверхности 1, 3, 5 и несколько сложных профильных глубоких канавок 2, 4 с небольшими радиусами сопряжений (рис. 1).

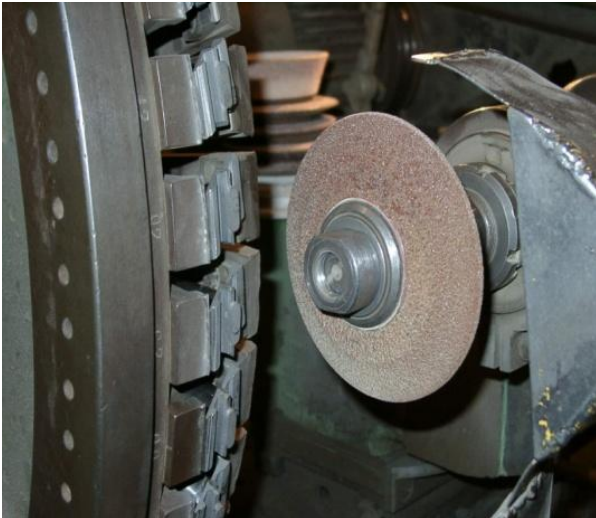
На станке мод. МК163М устанавливается шлифовальная головка, а лопатки собираются на планшайбе станка в специальное роторное приспособление по 30–40 штук. При шлифовании применяются несколько типоразмеров шлифовальных кругов диаметром 150–200 мм для последовательной обработки торцов и периферии профиля бандажной полки лопатки (рис. 2).



**Рис. 1.** Общий вид радиусных поверхностей полок турбинной лопатки газотурбинного двигателя ПС90 А: 1, 3, 5 – выступы, 2, 4 – впадины

Профиль бандажной полки формируется путем врезного и круглого шлифования боль-

шой номенклатурой кругов на бакелитовой и вулканитовой связке: 250×4×32 25A50НСТ1...СТЗБУ; 250×4,5×32 25A40...25НСТВ; 12–150×16×32 25A40...25НСМ2...СТ1К с пропиткой бакелитом; 11-125×45×32 25A40...25НСМ2...СТ1К с пропиткой бакелитом.



**Рис. 2.** Общий вид зоны профильного круглого врезного шлифования лопаток в роторных приспособлениях на модернизированном токарно-лобовом станке мод. МК163М

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. В свою очередь неблагоприятные параметры качества поверхностного слоя отражаются на эксплуатационных параметрах работы деталей. Происходит снижение усталостной прочности деталей [1]. Кроме этого, ввиду частой смены шлифовальных кругов, их правки и постоянного контроля точности каждой поверхности полки существенно возрастает вспомогательное время операции и общая трудоемкость обработки.

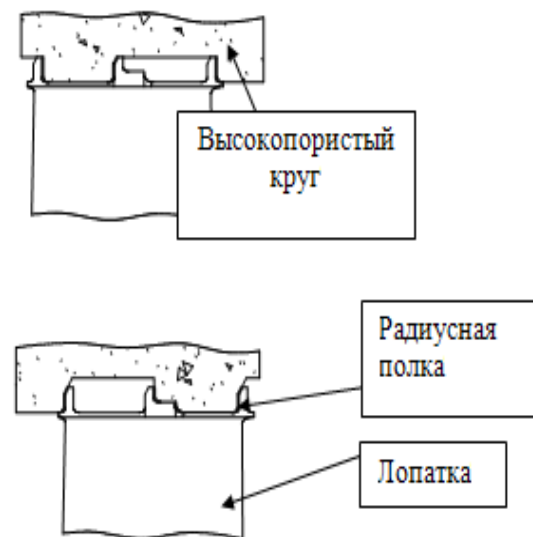
Большая трудоемкость и сложность выполнения данной операции в ручном режиме управления станком требуют использования рабочих высокой квалификации.

При этом требуется обеспечение точной установки деталей в сборное роторное приспособление, постоянный контроль за износом кругов, их правка, контроль размеров канавок и радиусов сопряжений, поднастройка станка. Рабочий находится постоянно в напряженном состоянии

в неблагоприятных санитарно-гигиенических условиях (абразивная пыль, шум, вибрации). Правка кругов по радиусам и торцам проводится вручную с помощью кусочков (обломков) абразивного круга из карбида кремния черного высокой твердости (ВТ).

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°C. Существует опасность разрыва круга, что может привести к угрозе жизнедеятельности рабочего персонала. Применение большей зернистости кругов для снижения прижогов приводит к увеличению шероховатости поверхности

Для решения этих проблем с целью повышения производительности, качества, точности и культуры производства разработан новый технологический метод многокоординатного глубинного шлифования профильных поверхностей бандажных полок лопаток турбин высокопористыми кругами на специальных многоосевых одношпиндельных станках-полуавтоматах с ЧПУ мод. Micro Cut 4 250-S840D фирмы ELB-Schleiff (Германия) по схемам, изображенным на рис. 3.

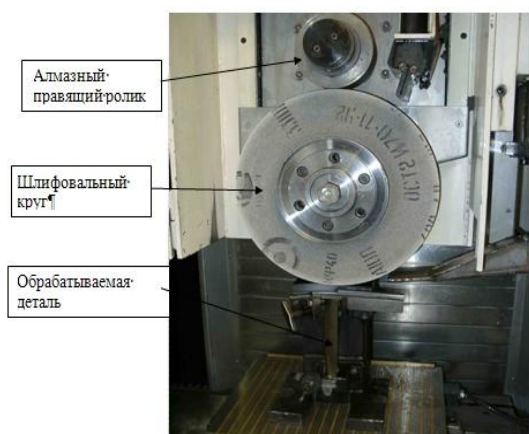


**Рис. 3.** Схемы глубинного шлифования выступов, торцев и канавок на радиусных поверхностях полок рабочих лопаток турбин высокопористыми кругами

На станках производится обработка полок по одной лопатке в индивидуальном приспособлении. Радиусная поверхность полок формируется путем интерполирования перемещения шлифовального круга системой ЧПУ при неподвижном столе с деталью и продольном пе-

ремещении стойки станка. Для обеспечения высокой производительности и недопустимости прижогов выбраны по специальной методике [2] высокопористые шлифовальные круги следующих характеристик: 1. 400×37×127 F13A 70 FF21 V (STRATO) фирмы TYROLIT (Австрия). На станке предусмотрена автоматическая балансировка и попутная правка круга.

Точность выполнения геометрии профиля бандажной полки обеспечивается точностью изготовления профиля алмазного правящего ролика. Правка осуществляется методом врезного шлифования. Для эффективного охлаждения зоны шлифования предусмотрена подача СОЖ – 4 % эмульсия ELB-ISOGRIND 130EP по профильным направляющим под давлением 12 атм. Очистка круга с помощью СОЖ производится с периферии и торца круга через три сопла под давлением 14 атм. Тонкая очистка СОЖ осуществляется с помощью ленточного бумажного фильтра MO22055. Система ЧПУ станка осуществляет непрерывную правку круга с контролем его диаметра и обеспечением постоянной скорости шлифования (рис. 4).



**Рис. 4.** Общий вид зоны шлифования радиусной полки лопатки турбины и одновременной правки шлифовального круга алмазным профильным роликом

Приведенные характеристики нового процесса глубинного шлифования, анализ технической литературы [3–5] 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.

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.

В результате предварительного исследования производительности, стойкости кругов и точности профиля полок лопаток при глубинном шлифовании 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 (табл.)

Сравнительный анализ трудоемкости обработки полок лопаток турбин показал, что применение новой технологии глубинного шлифования обеспечивает снижение времени обработки одной лопатки с 7–8 мин до 2,5–3 мин по сравнению с обработкой на токарно-лобовом станке.

Таблица

**Режимы глубинного шлифования профиля полок**

№ 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 $K$
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
5	0,05	0	20	300	-	-

где  $K = V_p / V_{кр}$ ,  $V_p$  – скорость круга;  $V_{кр}$  – скорость ролика.

Исследования качества поверхностного слоя проводились путем сравнения шероховатости, остаточных напряжений, наклепа и микроструктуры, полученных при старой и новой технологии. Для этого из различных поверхностей радиусных полок турбинных лопаток из жаропрочного сплава на никелевой основе ЧС70УВИ вырезались прямоугольные образцы электроэрозионным методом, измерялись и сравнивались значения шероховатости, остаточных напряжений и наклепа, а также микроструктура при старой и новой технологии.

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 малой зернистости 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 смазки при высоконапорной подаче СОЖ в зону шлифования, в то время как на токарно-лобовом станке МК163М обработка фасонных поверхностей идет всухую. 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.

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 новом оборудовании и случая применения высокопористых кругов позволяет стабильно получать значения шероховатости  $Ra = 0,63–0,8$  мкм, что меньше требуемых ( $Ra \leq 1,25$  мкм) по ТУ технологии.

Сравнительное исследование остаточных напряжений проводилось на образцах методом Н. Н. Давиденкова на приборе ПИОН-2.

При анализе результатов исследования влияния метода обработки на характер распределения остаточных напряжений на торцевой и периферийной поверхностях обработанной полки лопатки из сплава ЧС70УВИ представленных эпюр и характера формирования и распределения остаточных напряжений 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.

В результате анализа эпюр остаточных напряжений установлено, что обработка торцевых поверхностей бандажных полок турбинных лопаток на токарно-лобовом станке МК163М сопровождается появлением как остаточных напряжений сжатия до  $-15,7$  кг/мм<sup>2</sup> на глубине 50 мкм, так и растягивающих напряжений до  $+51,6$  кг/мм<sup>2</sup> на поверхности глубиной до 10 мкм. В поверхностном слое глубиной до 50 мкм образуются остаточные напряжения растяжения  $+23,8–+51,6$  кг/мм<sup>2</sup>. На глубине от 30 до 80 мкм растягивающие напряжения переходят в напряжения сжатия от  $-3,3$  до  $-15,7$  кг/мм<sup>2</sup>. 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.

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

Исследование характера распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя образцов проводилась методом косых шлифов с использованием микротвердомера ПМТ-3. Оценивалась глубина и степень наклепа при различных методах профильного шлифования полок.

В результате анализа полученных данных 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 до 10 мкм, т. е. в три раза, а степень наклепа  $N$  уменьшилась с 44,4 до 32 %, т. е. в среднем на 13 %. 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 сравне-

нию с серийной обработкой полок турбинных лопаток на токарно-лобовом станке МК163М. Это оказывает благоприятное воздействие на поверхностный слой. Известно, что повышенный наклеп отрицательно сказывается на работоспособности деталей, работающих в эксплуатации при весьма высоких температурах 800–1200° С.

Исследование микроструктуры проводилось на образцах, которые 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 и растрескивание по карбидам. С 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 материала и рекристаллизации.

Поверхность образцов, вырезанных из полок лопаток, обработанных методом глубинного шлифования на станке MicroCut 4 ровная, без надрывов. Изменений в микроструктуре с поверхности не наблюдается, нагартованного слоя, выкрашивания по карбидам не обнаружено.

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

Исследования по выявлению трещин методом ЛЮМ-контроля показали, что на полках, обработанных на токарно-лобовом станке МК163М, имеются микротрещины. После обработки методом глубинного шлифования на плоскошлифовальном станке Micro Cut 4 в поверхностном слое бандажных полок турбинных лопа-

ток трещин и других дефектов такого вида не обнаружено.

### ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что применение метода глубинного шлифования вместо обработки на токарно-лобовом станке обеспечивает повышение производительности труда в 2,5–3 раза и более высокое качество поверхностного слоя лопаток турбин. Так, шероховатость поверхности при глубинном шлифовании уменьшается с  $Ra = 0,85\text{--}1,2$  мкм до  $0,64\text{--}0,81$  мкм; остаточные напряжения носят более благоприятный характер; глубина и степень наклепа снизились на 30–40 %; улучшилось структурно-фазовое состояние поверхностного слоя; трещины в поверхностном слое не обнаружены.

Расчеты показали, что при внедрении глубинного шлифования полок 11 наименований лопаток турбины за счет снижения трудоемкости, за счет снижения затрат на изготовление и обслуживание оснастки, экономии от снижения затрат на инструмент с учетом дополнительных затрат на алмазные ролики и СОЖ экономия составит более 900 тыс. рублей в год.

Срок окупаемости двух новых станков, по расчету, составил 6,6 лет. Таким образом, на основе вышеприведенных данных можно сделать вывод об экономической целесообразности внедрения нового оборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров В. Ф., Попов А. Н., Евсин Е. А. Повышение сопротивления усталости турбинных лопаток путем управления качеством поверхностного слоя при профильном глубинном шлифовании // Инструмент и технологии. 2003. № 11–12. С. 1114.
2. Макаров В. Ф., Попов А. Н., Семиколенных В. В., Титаренко Н. В. Способ выбора шлифовального круга: патент на изобретение RU № 2217730 C2 МКИ G 01 N 3/32 27.11.03. Опуб. в БИ 2003, № 33.
3. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
4. Полетаев В. А., Волков Д. И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.
5. Макаров В. Ф., Сакаев А. Х. Научно-техническая технология глубинного шлифования профильных поверхностей лопаток турбин // Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 3 (9). С. 15–22.

### ОБ АВТОРАХ

**МАКАРОВ Владимир Федорович**, зам. зав. каф. инновационных технологий машиностроения. Дипл. инж.-мех.. Д-р техн. наук, проф.

**САКАЕВ Альберт Халилович**, нач. лаб. шлифования и отделочных работ, асп. той же каф. Дипл. инж.-мех.

### METADATA

**Title:** Increase of productivity and quality of grinding of profile surfaces of shovels of turbines on multi-axial machine tools with CNC.

**Authors:** V.F. Makarov<sup>1</sup>, A.H. Sakaev<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> "Perm National Research Polytechnic University" (PNIPU).

<sup>2</sup> JSC"PMZ", Russia.

**Email:** <sup>1</sup> makarow@pstu.ru, <sup>2</sup> Sakaev\_Albert@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61), pp. 45-50, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The comparative analysis of handling of profile surfaces of blades of the turbine on the multicoordinate grinding machine tool and the traditional circuit of handling is resulted. Practical application and acknowledgment of efficiency of application of multicoordinate handling is considered. The equipment on which tests were produced is visually shown. Quality of a blanket of the processed surface received is considered at different methods of grinding. It is marked that the most preferable method of handling of profile surfaces is multicoordinate handling.

**Key words:** grinding circle; profile depth grinding; editing; abrasive tool; grinding machine tool.

**References (English transliteration):**

1. V. F. Makarov, A. N. Popov, and E. A. Evsin, "Increased fatigue resistance of turbine blades by controlling the quality of the surface layer at profile creep feed grinding," *Tools and technology*, no. 11-12, pp. 11-14, St. Petersburg, 2003.
2. V. F. Makarov, A. N. Popov, V. V. Semikolenykh, and N. V. Titarenko, *A method of selecting a grinding wheel*, Patent for an invention RU 2217730 C2 MKI G 01 N 3/32 27.11.03. Pub. in BI, no. 33, 2003.
3. V. K. Starkov, *Highly porous grinding circles*. Moscow: Mashinostroenie, 2007.
4. V. A. Poletaev, *Deep grinding turbine blades library technologist*. Moscow: Mashinostroenie, 2009.
5. V. F. Makarov and A. H. Sakayev, "High technology deep grinding profiled surfaces of turbine blades," *High Tech engineering*, Moscow, no. 3 (9), pp. 15-22, 2012.

**About authors:**

**MAKAROV, Vladimir Fedorovich**, Dr. Sci. Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Innovative Technologies Engineering.

**SAKAYEV, Albert Halilovich**, graduate student, Head of Laboratory grinding and finishing works.