



УДК 621.454.2

### Определение качественных показателей глубинного шлифования замковых соединений турбинных лопаток при изготовлении или ремонте

**В.А. СКРЯБИН**, д-р техн. наук, профессор, **И.М. МАКСИМОВ**, магистр,

**Д.Ю. МЕЛЬНИКОВ**, магистр

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026, Российская Федерация

E-mail: vs\_51@list.ru

DOI: 10.31044/1684-2561-2026-0-7-3-8

Поступила в редакцию 17.12.2025

После доработки 12.02.2026

Принята к публикации 07.04.2026

*В статье рассмотрены вопросы обеспечения шероховатости поверхностей елочного замкового соединения турбинной лопатки. Приведены зависимости параметра шероховатости от режимных параметров процесса глубинного шлифования.*

**Ключевые слова:** турбинная лопатка, елочное замковое соединение, глубинное шлифование, режимные параметры.

*The article considers the issues of ensuring the surface roughness of the fir-tree lock joint of a turbine blade. Dependencies of the roughness parameter on the process parameters of deep grinding are presented.*

**Keywords:** turbine blade, fir-tree lock joint, deep grinding, process parameters.

#### Введение

В процессе финишной абразивной обработки при изготовлении или ремонте шлифуемой поверхности детали основными качественными показателями являются шероховатость, внутренние остаточные напряжения 1-го рода, микротвердость поверхностного слоя, глубина, градиент и степень наклепа. Эти показатели особенно важны при глубинном шлифовании сложно-профильных деталей из литейных труднообрабатываемых сплавов АНВ 300, ЖС6К. Глубинное шлифование предусматривает большие глубины резания и медленную ползучую подачу. При этом значительно меньше ощущается влияние исходных погрешностей формы и колебания припуска

на результаты обработки. Поэтому глубинное шлифование применяют для обработки заготовок без предварительной лезвийной обработки. Так, при изготовлении турбинных лопаток производительность увеличилась в 4 раза, точность — в 2 раза, шероховатость поверхности снизилась в 2 раза, значительно повысилась работоспособность замкового соединения. При опытной обработке условий и режимов шлифования были тщательно исследованы все контролируемые показатели качества обработанной поверхности: шероховатость, глубина и степень наклепа, остаточные напряжения, микроструктура, возможность появления шлифовочных трещин. Одним из проблемных вопросов финишной абразивной

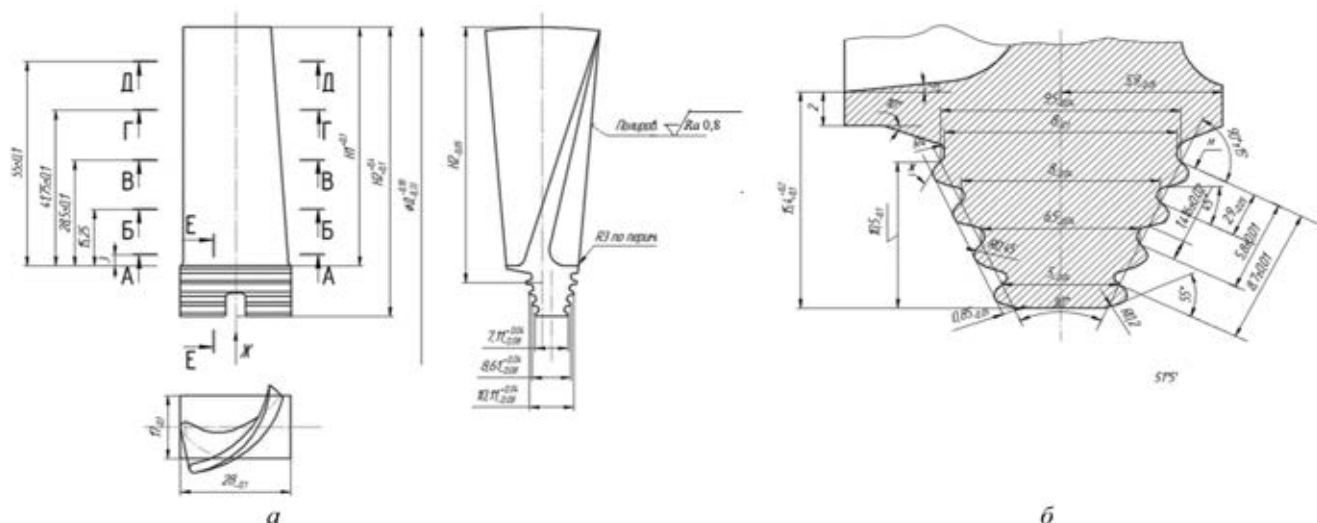


**Рис. 1. Турбинная лопатка:**

*a* — чертеж профиля турбинной лопатки; *б* — чертеж профиля замкового соединения лопатки

обработки деталей является обработка турбинных лопаток (рис. 1), в частности, елочного замкового соединения (ЕЗС).

## Материалы и методы

Лопатка турбокомпрессора дизеля является наиболее нагруженной деталью, работающей в тяжелых условиях, что определяет длительность службы турбокомпрессора, т.е. его ресурс. Хвостовик лопатки кроме растяжения и изгиба от центробежных сил, изгиба и кручения от газового потока испытывает также и термические напряжения, быстрый нагрев в момент запуска и быстрое охлаждение при остановке двигателя.

В соответствии с работами [1—3] и ранее проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями получена зависимость показателя шероховатости  $R_a$  от режимных параметров процесса финишной абразивной обработки деталей из труднообрабатываемых литейных сплавов:

$$R_a = 2 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{t^{0,17} \cdot v_{\text{д}}^{-0,6} \cdot S^{0,6}}{v_{\text{к}}^{0,85}} \right), \quad (1)$$

где  $t$  — глубина шлифования, выбирается исходя из величины припуска, мм;  $v_d$  —

продольная скорость перемещения детали, м/мин;  $v_k$  — скорость вращения круга, м/с;  $S$  — поперечная подача шлифования, мм/дв. ход.

Первостепенное значение имеют графические зависимости, которые характеризуют влияние режимных параметров на величину шероховатости поверхности. При определении зависимости шероховатости от глубины шлифования варьируемые факторы при заданных скоростях шлифовального круга находятся в определенном диапазоне ( $t_1 = 0,05 \cdot 10^{-3}$  м;  $t_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $t_3 = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м).

При изменении глубины шлифования в вышеуказанном диапазоне расчетные параметры шероховатости  $R_a$  имеют следующие значения:

$$R_{a1} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,05 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (4,16 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,75 \text{ MKM};$$

$$R_{a2} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,1 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (4,16 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,84 \text{ MKM};$$

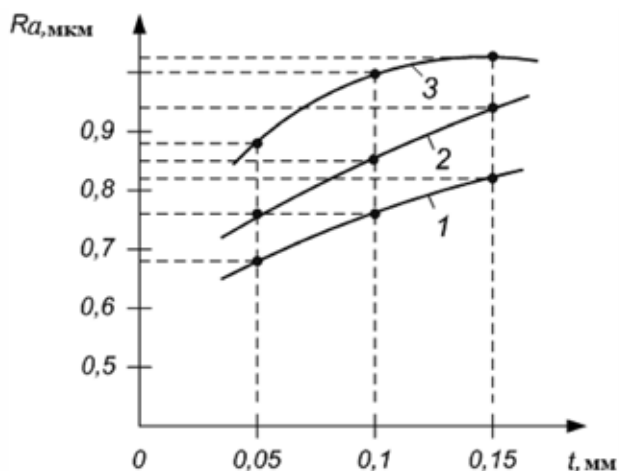


Рис. 2. Зависимость шероховатости от глубины шлифования при изменении скорости круга:

1 —  $v_k = 35$  м/с; 2 —  $v_k = 30$  м/с; 3 —  $v_k = 25$  м/с

$$R_{a3} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,15 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (4,16 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,91 \text{ мкм.}$$

Анализ графика зависимости (рис. 2) показал, что интенсивное изнашивание круга наступает при  $t_3 = 0,15$  мм, со скоростью круга  $v_{кр3} = 25$  м/с.

При определении изменения шероховатости поверхности от продольной скорости перемещения детали  $v_d$  ( $v_{d1} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $v_{d2} = 4,16 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $v_{d3} = 5,8 \cdot 10^{-3}$  м/с) получены следующие величины критерия  $R_a$ :

$$R_{a1} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,05 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,91 \text{ мкм;}$$

$$R_{a2} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,05 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (4,16 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,67 \text{ мкм;}$$

$$R_{a3} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,05 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (5,8 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,54 \text{ мкм.}$$

Обработка турбинных лопаток (см. рис. 1), в частности, елочного замкового соединения, ведется с помощью глубинного шлифования [4, 5].

Лопатка турбокомпрессора дизеля является наиболее нагруженной деталью, работающей в тяжелых условиях, что определяет длительность службы турбокомпрессора, т.е. его ресурс.

При определении зависимости шероховатости от глубины шлифования варьируемые факторы при заданных скоростях шлифовального круга находятся в определенном диапазоне ( $t_1 = 0,05 \cdot 10^{-3}$  м;  $t_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $t_3 = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м).

Анализ графика (см. рис. 2) показал, что интенсивное изнашивание круга наступает при  $t_3 = 0,15$  мм, со скоростью круга  $v_{кр3} = 25$  м/с.

При определении изменения шероховатости поверхности от продольной скорости перемещения детали  $v_d$  ( $v_{d1} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $v_{d2} = 4,16 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $v_{d3} = 5,8 \cdot 10^{-3}$  м/с) получены следующие величины критерия  $R_a$ :

$$R_{a1} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,05 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,91 \text{ мкм;}$$

$$R_{a2} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,05 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (4,16 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,67 \text{ мкм;}$$

$$R_{a3} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,05 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (5,8 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,54 \text{ мкм.}$$

Исследование зависимости показателей шероховатости  $R_a$  от скорости продольной подачи детали при различных глубинах шлифования приведено на рис. 3.

Из графика (см. рис. 3) следует, что с уменьшением продольной скорости пе-

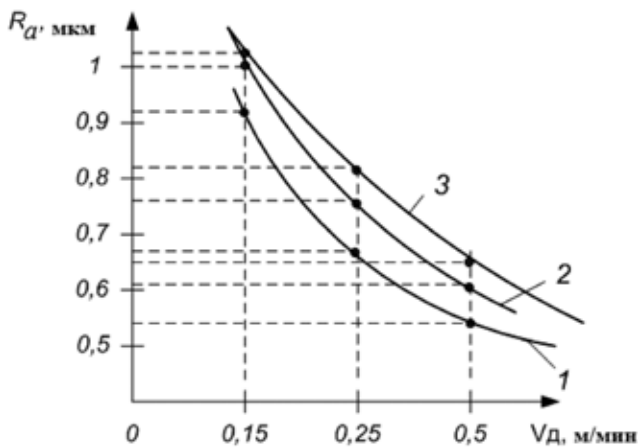


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности от скорости продольной подачи детали при различных глубинах шероховатости:

1 —  $t = 0,05$  мм; 2 —  $t = 0,1$  мм; 3 —  $t = 0,15$  мм

ремещения детали происходит резкое увеличение шероховатости поверхности, при этом происходит процесс интенсивного изнашивания и объемного разрушения абразивных зерен круга [3, 6].

Определение применения параметра шероховатости  $R_a$  поверхности от скорости вращения шлифовального круга ( $v_{кр} = 25$  м/с;  $v_{кр} = 30$  м/с;  $v_{кр} = 35$  м/с) при различных скоростях продольной подачи детали дают следующие значения:

$$R_{a1} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,15 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{25^{0,85}} \right] = 1,46 \text{ мкм};$$

$$R_{a2} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,15 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (4,16 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,92 \text{ мкм};$$

$$R_{a3} = 2 \cdot 10^4 \times \left[ \frac{(0,15 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot (5,8 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{35^{0,85}} \right] = 0,66 \text{ мкм}.$$

При обработке ЕЗС с помощью глубинного шлифования основными недостатками являются износ и засаливание абразив-

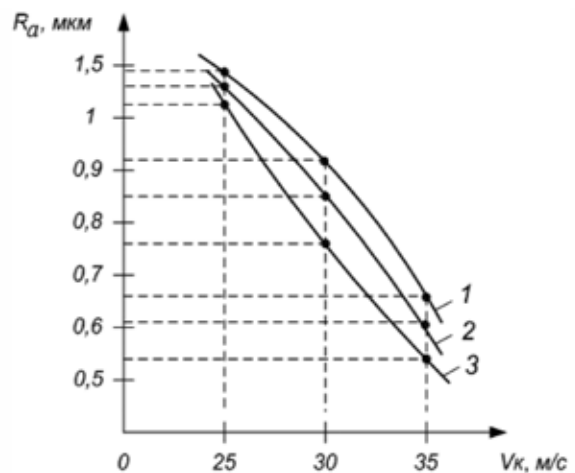


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от скорости абразивного круга:

1 —  $v_d = 0,15$  м/мин; 2 —  $v_d = 0,25$  м/мин; 3 —  $v_d = 0,35$  м/мин

ных кругов, что приводит к теплонапряженности процесса обработки и, как следствие, к низкой производительности. Одним из методов устранения этих недостатков является непрерывная правка абразивных кругов алмазными роликами (АР), а также свойства и количество подводимых смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Использование непрерывной правки АР как на черновом, так и на чистовом переходе сопряжено с возникновением дополнительных вибраций в технологической системе.

Наиболее широкое применение получил метод глубинного [1—3] шлифования

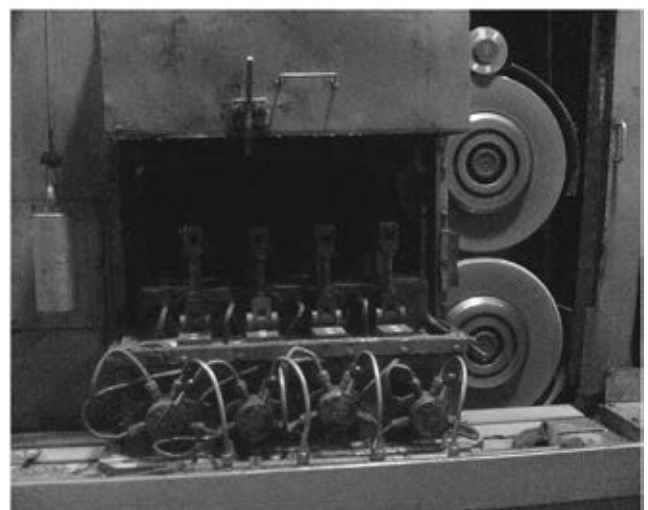


Рис. 5. Вид рабочей зоны станка ЛШ233М

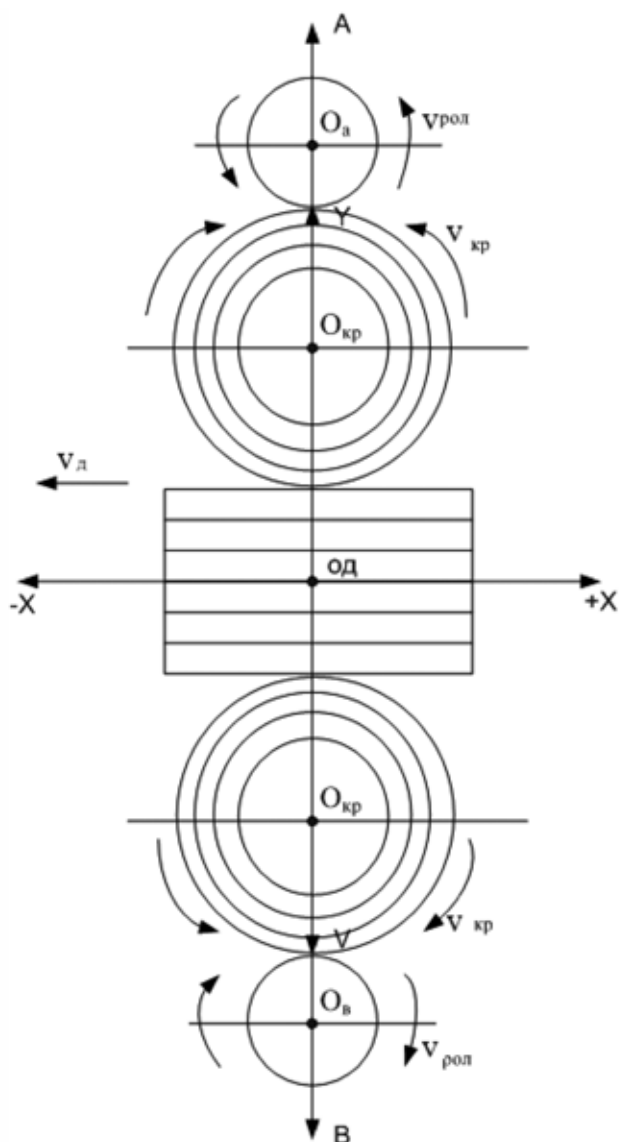


Рис. 6. Схема обработки замкового соединения лопаток при встречном и попутном вращениях абразивных кругов и алмазных роликов

с непрерывной правкой абразивных шлифовальных кругов алмазными роликами за два рабочих хода на специальных шлифовальных станках с ЧПУ: одношпиндельном ЛШ183М и двухшпиндельном ЛШ233М (рис. 5).

В качестве режущего инструмента используют высокопористые фасонные круги 3П размером 500×25×203 из электрокорунда белого 25А, зернистостью 10 (0,01 мм) 10П (повышенное содержание фракции П абразивных зерен) ВМ212К5 ПГ класса точности А, 1-го класса неуравновешенности

со скоростью резания 35 м/с. Обработку деталей производят в соответствии с технологическими режимами:  $v_k = 35$  м/с;  $v_d = 200$  мм/мин; с СОТС (смазочно-охлаждающими технологическими средствами) АКВОЛ-10М (водно-масляный состав).

В качестве правящего инструмента применяли алмазные правящие ролики (АР) АС65Т, АС82Т, АС-132 с зернистостью 10. Материал лопаток турбокомпрессоров — труднообрабатываемый жаропрочный литейный сплав АНВ300 и жаропрочная сталь 31Х19Н9, а также сплав на никелевой основе ХН70ВМТЮ. В работах [5, 6] приведены режимы шлифования и правки при попутном и встречном вращениях правящего алмазного ролика.

#### 1. Черновой переход.

|                                                             |                |
|-------------------------------------------------------------|----------------|
| Припуск на обработку, мм                                    | $Z = 1,4—1,8;$ |
| Скорость круга, м/с                                         | $v_{кр} = 25;$ |
| Скорость подачи стола станка с деталью, мм/мин              | $v_d = 80;$    |
| Подача ролика на круг, мм на 10 оборотов шлифованного круга | 0,006.         |

#### 2. Чистовой переход.

|                                                             |                   |
|-------------------------------------------------------------|-------------------|
| Припуск на обработку, мм                                    | $Z = 0,1—0,16;$   |
| Скорость круга, м/с                                         | $v_{кр} = 26—28;$ |
| Скорость подачи стола станка с деталью, мм/мин              | $v_d = 200—400;$  |
| Подача ролика на круг, мм на 10 оборотов шлифованного круга | 0,004.            |

При встречном вращении ролика и круга:

#### 1. Черновой переход.

|                                                              |                |
|--------------------------------------------------------------|----------------|
| Припуск на обработку, мм                                     | $Z = 1,5—2;$   |
| Скорость круга, м/с                                          | $v_{кр} = 27;$ |
| Скорость подачи стола станка с деталью, мм/мин               | $v_d = 100;$   |
| Подача ролика на круг, мм на 10 оборотов шлифовального круга | 0,004.         |

#### 2. Чистовой переход.

|                                                              |                   |
|--------------------------------------------------------------|-------------------|
| Припуск на обработку, мм                                     | $Z = 0,05—0,1.$   |
| Скорость круга, м/с                                          | $v_{кр} = 27—30;$ |
| Скорость подачи стола станка с деталью, мм/мин               | $v_d = 300—500;$  |
| Подача ролика на круг, мм на 10 оборотов шлифовального круга | 0,002.            |

На рис. 6 приведена схема обработки замкового соединения лопаток при встречном и попутном вращениях абразивных кругов и алмазных роликов.

Анализ результатов исследований показал [33], что в зависимости от числа зубьев ЕЗС (4, 5, 6) и припуска на обработку ( $Z = 1,5\text{--}2$  мм) при непрерывной правке алмазными роликами обеспечивается высокая режущая способность абразивного круга, при этом амплитуда колебаний возрастает при попутной правке из-за колебания соотношения скоростей круга и роликов в пределах  $0,8\text{--}0,9$ . Следовательно, шероховатость ( $R_a$ ) и волнистость ( $W_z$ ), шаг волнистости ( $S_{\text{мволн}}$ ) поверхности будет выше, чем при встречном направлении вращения шлифовального круга. При этом составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  и их рассеивание увеличиваются.

Сравнение величины шероховатости по критерию  $R_a$  по приведенным выше зависимостям и в производственных условиях показало, что относительная погрешность не превышает  $10\text{--}12\%$ , что свидетельствует о достаточной точности расчета шероховатости по предложенной формуле (1).

### Выводы

Полученная формула зависимости шероховатости от режимных параметров процесса глубинного шлифования позволяет определять величину шероховатости поверх-

ности и стабильно обеспечивать качество поверхностей елочного замкового соединения турбинной лопатки.

### Финансирование работы

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

### Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Использование ИИ

Авторы данной работы заявляют, что при подготовке статьи технологии искусственного интеллекта не использовались.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рахмарова М.С., Мирер Я.Г.** Влияние технологических факторов на надежность лопаток газовых турбин. М.: Машиностроение, 1966. 223 с.
2. **Силин С.С., Хрульков В.А., Лобанов А.В., Рыкунов Н.С.** Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1984. 64 с.
3. **Колосеев В.В., Полутан Б.И.** Алмазные правящие ролики при врезном шлифовании деталей машин. Киев: Наукова думка, 1983. 144 с.
4. **Силин С.С., Леонов Б.Н., Хрульков В.А. и др.** Оптимизация технологии глубинного шлифования / П.Н. Орлов. М.: Машиностроение, 1989. 120 с.
5. **Жук А.П., Скрябин В.А., Репин А.С.** Особенности, технологии обработки хвостовика лопаток турбокомпрессоров // Машиностроитель. М.: Изд-во «Выраж-центр», 2006. № 7. С. 26—28.
6. **Скрябин В.А.** Влияние процесса глубинного шлифования елочного профиля хвостовика лопаток турбокомпрессора на качественные характеристики поверхностного слоя // Надежность и качество: тр. Междунар. симп. Пенза. 2006. Т. 2. С. 123—125.