

М. А. МИШКИНА, В. Л. ЮРЬЕВ

## ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СЪЕМА ПРИ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

Рассмотрено влияние технологических факторов и геометрии детали и инструмента на величину площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью и величину производительности съема при нестационарном электроалмазном шлифовании лопаток компрессора ГТД. *Электроалмазное шлифование, площадь контакта, нестационарность процесса, поверхностный слой, производительность съема, скорость подачи по строчке*

Большое влияние на качество поверхностного слоя деталей и, в связи с этим, на их эксплуатационные свойства оказывает финишная обработка [3]. На машиностроительных предприятиях проблема улучшения качества поверхностного слоя деталей в основном решается подбором оптимального режима шлифования и соответствующей характеристики инструмента. Из всех элементов режима резания наибольшее влияние на показатели процесса оказывает глубина шлифования. Увеличение глубины шлифования приводит к росту силы резания и расхода алмазов. Это объясняется в первую очередь тем, что с увеличением глубины растет толщина слоя, срезаемого одним зерном, следствием чего является увеличение нагрузки на зерно. Кроме того, увеличивается площадь контакта инструмента с изделием и усиливается трение связки об обрабатываемый материал. Увеличение продольной подачи приводит к росту толщины срезаемого слоя. Одновременно при этом площадь контакта круга с деталью и сила трения связки об обрабатываемую деталь изменяются незначительно. В связи с этим рост составляющих силы резания, а следовательно, и удельного расхода алмазов, с увеличением продольной подачи невелик. Влияние глубины на удельный расход проявляется значительно, чем скорости изделия, поэтому при назначении режимов резания следует считать более предпочтительным режим с повышенной скоростью изделия и пониженной глубиной, как обеспечивающий меньшие усилия и удельный расход алмазов при равной производительности.

В процессе изготовления и эксплуатации лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) на их поверхности возникают дефекты, в поверхностном слое возникают остаточные напряжения, изменяется структура, фазовый и хи-

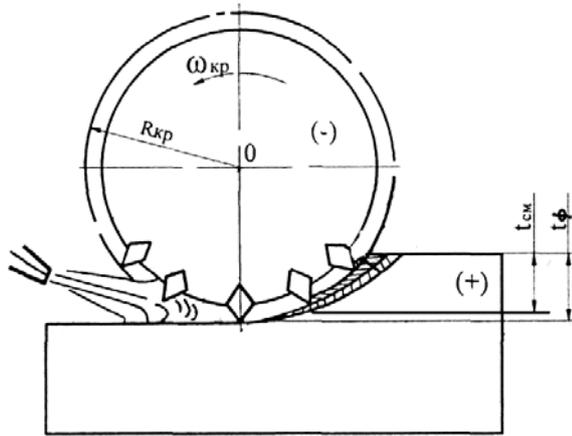
мический состав. В большинстве случаев разрушение лопаток (износ, эрозия, коррозия, усталостные трещины) начинается с поверхности, поскольку в условиях эксплуатации поверхностный слой подвергается сильному механическому, тепловому и химическому воздействию. Поэтому для увеличения ресурса и надежности работы лопаток необходимо выполнить технологическое обеспечение работоспособности поверхностного слоя. Для этого решаются две задачи, одна из которых состоит в выборе параметров качества поверхностного слоя, а другая – в выборе оптимального варианта обработки, обеспечивающего эти параметры [4].

Наибольшее влияние на эксплуатационные свойства деталей машин оказывает комплекс показателей качества, включающий параметр шероховатости, характеризующийся величиной микронеровностей, глубину и степень деформационного упрочнения (наклепа) поверхностного слоя, величину и знак остаточных напряжений [1]. Для управления качеством поверхностного слоя лопаток при чистовой обработке (шлифовании) необходимо иметь аналитические зависимости между технологическими параметрами процесса и характеристиками качества обработки.

Анализ патентов, научно-технической литературы показывает, что для обработки лопаток компрессора ГТД наиболее производительным и обеспечивающим высокое качество обработанной поверхности является способ электроалмазного шлифования.

Сущность процесса электроалмазного шлифования заключается в сочетании анодного растворения и резания алмазными зёрнами обрабатываемого материала при подключении детали и инструмента к полюсам источника питания.

Электроалмазное шлифование (рис. 1) обеспечивает по сравнению с обычным шлифованием без тока снижение эффективной мощности на приводе шпинделя и сил резания за счет уменьшения толщины срезаемой каждым зерном стружки и затрат мощности на трение.



**Рис.1.** Схема съема материала при электроалмазном шлифовании:

$t_{см}$  – глубина «смешанного» съема (механическое резание+электрохимическое растворение),  
 $t_{ф}$  – фактическая глубина резания

Величина съема обрабатываемого материала определяется при этом виде обработки электрохимической (анодное растворение), механической (резание) и эрозивной (микроплавление) составляющими. Механическое воздействие заключается в микрорезании поверхностного слоя и удалении продуктов растворения зернами шлифовального круга. Зерна шлифовального круга, выступающие из электропроводной связки, создают определенный межэлектродный зазор между связкой (катодом) и поверхностью обрабатываемой детали (анодом). Наличие электрохимической составляющей и обильный полив электролита позволяют существенно снизить температуру в зоне обработки, а также исключить образование заусенцев на кромке. В результате этого повышается производительность процесса обработки, улучшается качество поверхностного слоя, значительно возрастает размерная стойкость профильного инструмента.

Процесс электроалмазного шлифования лопаток компрессора является нестационарным вследствие [2]:

- переменного радиуса кривизны обрабатываемой поверхности;
- неравномерности распределения припусков на заготовках;
- непрерывного изменения величин режимов резания;

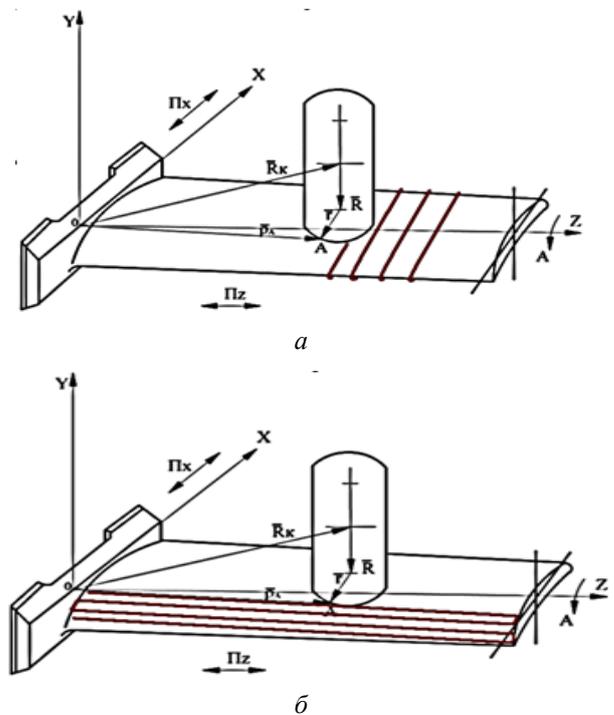
- относительно малой жесткости пера, вызывающей переменную величину глубины резания;

- переменного сечения среза, вызывающего изменение плотности тока.

При электроалмазном шлифовании пера лопаток компрессора производительность и качество обработки зависят от условий контактирования зерна с поверхностью, определяемых следующими параметрами: толщиной среза, количеством зерен, участвующих в процессе шлифования и длиной дуги контакта с заготовкой, а также от режимов шлифования.

Перо лопатки ГТД образовано сочетанием большого числа сложных поверхностей. Кроме того, особенностью лопаток компрессора является малая жесткость пера.

Для обработки поверхностей спинки и корыта пера лопаток компрессора с высотой пера до 300 мм и хордой до 200 мм предназначен станок с ЧПУ модели 4ШСЛ-300ПЗ. На станке могут быть реализованы процессы алмазного и электроалмазного шлифования токопроводящими алмазными кругами. Схема формообразования заданной поверхности на этом станке может осуществляться путем нанесения продольных или поперечных строк (рис. 2).



**Рис. 2.** Схемы формообразования на специализированном шлифовальном станке с ЧПУ модели 4ШСЛ-300ПЗ:  
 а – круговой поперечной строккой;  
 б – продольной строккой

При шлифовании различных участков сложной криволинейной поверхности лопатки изменяется длина дуги контакта, а следовательно, и площадь пятна контакта инструмента с поверхностью.

Инструментом при электроалмазном шлифовании является токопроводящий шлифовальный круг, рабочая поверхность которого имеет форму тора.

Площадь контакта  $S_{\text{конт}}$  тороидального круга определяется умножением дуги контакта круга с деталью в продольном сечении на длину дуги контакта круга с деталью в поперечном сечении (рис. 3).

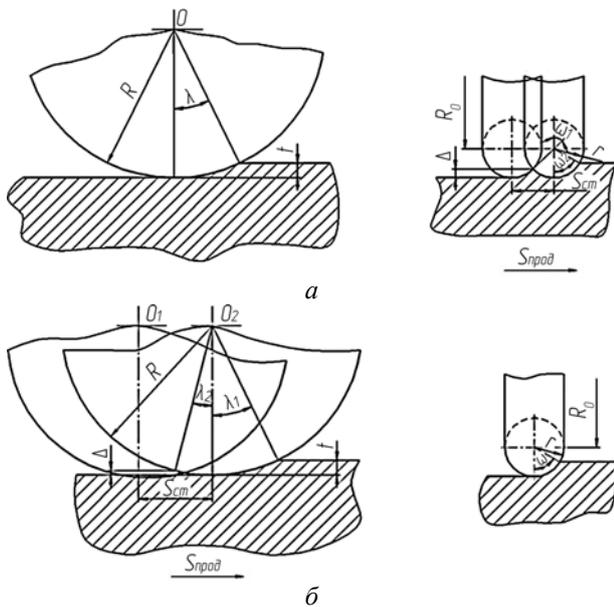


Рис. 3. Схемы плоского шлифования тороидальным кругом для двух схем формообразования: а – поперечная; б – продольная

Углы контакта круга с деталью в 2 плоскостях ( $\lambda_i, \omega_i$ ) определяются путем геометрических построений и зависят от радиуса тора  $r$ , радиуса направляющей окружности  $R_0$ , глубины резания  $t$  и величины остаточного гребешка  $\Delta$ , образуемого при перестановке шлифовального круга на строку.

При шлифовании плоской поверхности глубина резания  $t$  – величина постоянная. Но при шлифовании сложнофасонной поверхности (перо лопатки) глубина резания изменяется в зависимости от кривизны профиля.

Проведен численный эксперимент по определению влияния технологических параметров и геометрии детали и инструмента на величину площади контакта. По результатам численного эксперимента построены графики зависимости площади контакта от подачи на строку, глубины резания, радиуса кривизны лопатки и радиуса тора шлифовального круга (рис. 4–7).

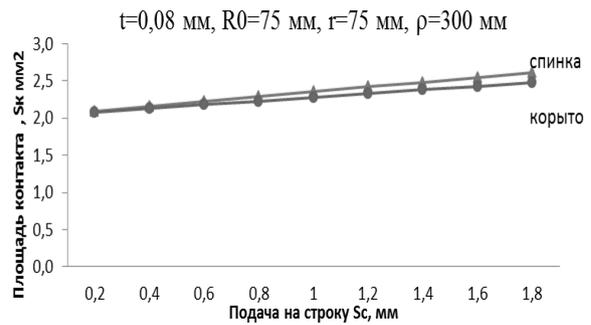


Рис.4. Зависимость площади контакта от подачи на строку

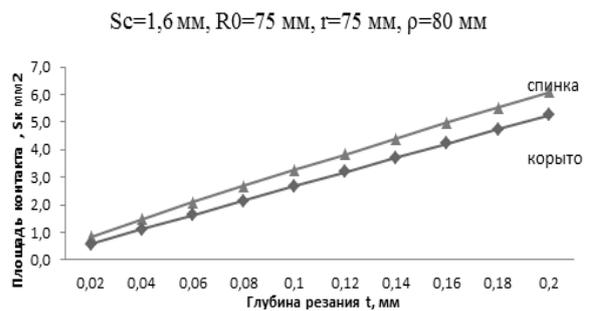


Рис.5. Зависимость площади контакта от глубины резания

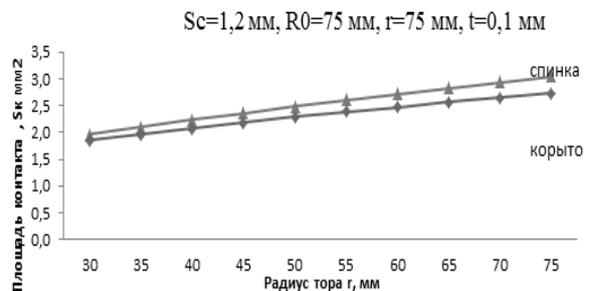


Рис.6. Зависимость площади контакта от радиуса тора шлифовального круга

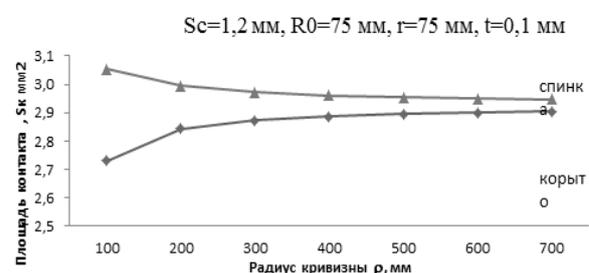


Рис.7. Зависимость площади контакта от радиуса кривизны лопатки

Из графиков видно, что увеличение подачи на строку и глубины резания приводит к равномерному возрастанию площади контакта. Площадь контакта возрастает при увеличении радиуса тора шлифовального круга при обработке спинки и корыта. Увеличение радиуса кривизны приводит к увеличению площади контакта при обработке корыта

и к снижению площади контакта при обработке спинки лопатки.

В качестве показателя эффективности процесса электроалмазного шлифования была принята производительность съема материала в минуту  $Q_m$ , мм<sup>3</sup>/мин.

Проведен численный эксперимент по установлению влияния технологических факторов на процесс электроалмазного шлифования рабочей лопатки I ступени КНД при обработке поперечной строккой, позволяющий выявить степень влияния нестационарных параметров на производительность съема обработки. Расчет производительности съема проводился для десяти сечений лопатки (A1÷A10), каждое из которых задано 32 точками (16 точек для спинки, 16 точек для корыта лопатки). В расчет не брались сечения в зоне антивибрационной полки и замка, а также теоретические сечения, выходящие за реальный профиль. Численный эксперимент показал, что на производительность съема оказывают влияние величина площади контакта ( $S_{\text{конт}}$ ) и величина скорости подачи по строкке ( $S$ ). При шлифовании лопатки компрессора поперечной строккой величина  $S$  изменяется в больших пределах (рис. 8), вызывая тем самым значительную (до 92%) степень нестационарности данного технологического параметра, определяемого по формуле:

$$N(s) = \frac{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}}{S_{\text{max}}} 100\% \quad (1)$$

Величина площади контакта непрерывно изменяется от точки к точке в одном сечении (рис. 9). Степень влияния этого параметра на величину производительности съема незначительно.

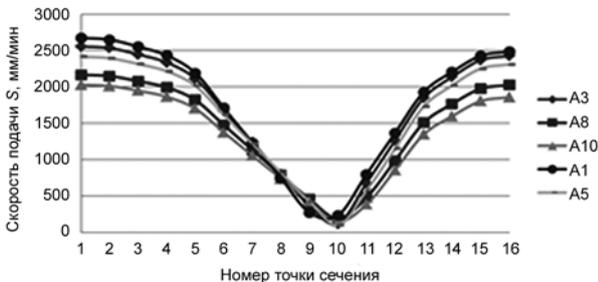


Рис.8. Изменение величины скорости подачи в зависимости от положения точки в сечении

Построен график зависимости производительности съема от скорости подачи по строкке (рис. 10) и график, показывающий изменение производительности съема в зависимости от положения точки с заданными координатами в одном сечении (рис. 11). Видно,

что производительность съема линейно возрастает при увеличении скорости подачи для всех сечений и изменяется от точки к точке в одном сечении.

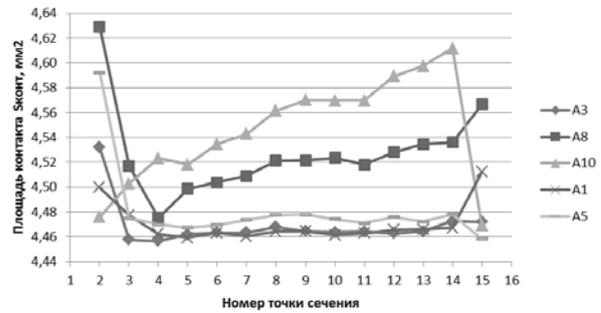


Рис.9. Изменение площади контакта в зависимости от положения точки в сечении

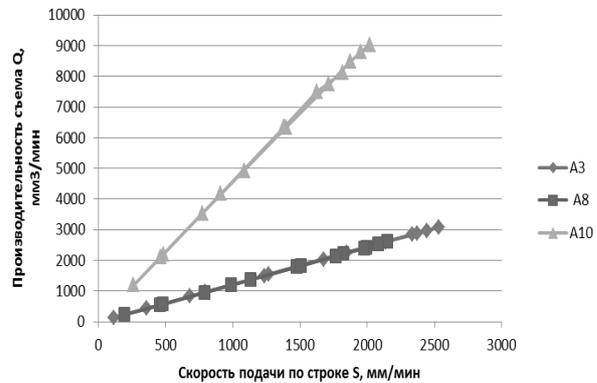


Рис.10. Влияние скорости подачи по строкке на величину производительности съема

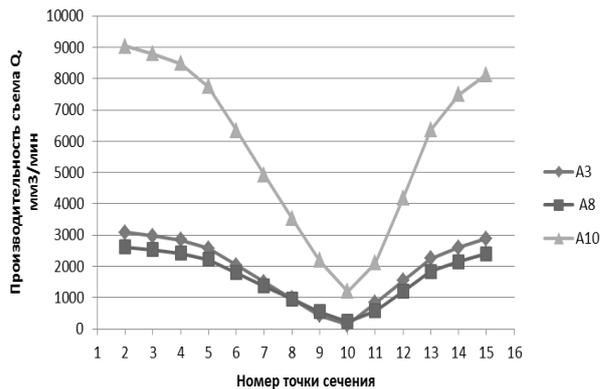


Рис.11. Изменение производительности съема в зависимости от положения точки в сечении

По результатам численного эксперимента можно сделать вывод, что нестационарные технологические параметры, непрерывно изменяющиеся во времени при обработке лопатки, и их возможные сочетания будут оказывать существенное влияние на параметры качества поверхностного слоя.

Полученные аналитические зависимости площади контакта тороидального шлифовального круга с поверхностью лопатки и производительности съема при различных схемах шлифования могут быть положены в основу определения технологических параметров обработки, учитывающих нестационарность процесса электроалмазного шлифования лопаток, реализация которых позволит корректировать управляющие программы на станках с ЧПУ с целью обеспечения заданного физико-химического состояния поверхностного слоя детали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
2. Постнов В. В., Юрьев В. Л. Термодинамика и технология нестационарной обработки металлов резанием. М.: Машиностроение, 2009. 269 с.
3. Безъязычный В. Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 539 с.
4. Силин С. С. Метод подобию при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Мишкина Марина Александровна**, соискат. каф. технол. машиностроен. (УГАТУ, 2008). Дипл. инж. техн. по машиностроению (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. технологии нестационарной механической обработки.

**Юрьев Виктор Леонидович**, проф. каф. технол. машиностроен., ген. дир. ОАО НИИТ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. технологии нестационарной механической обработки.