

УДК 621.9

А. Н. Михайлов¹, д-р техн. наук, проф., А. В. Анастасьев¹, аспирант,
Н. С. Пичко², д-р филол. наук, проф.

¹ Донецкий национальный технический университет,

² Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинск

Тел. / Факс: +7 949 349 74 28; E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТОЯНСТВА КОНТАКТНОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ПЕРА ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГТД

В статье рассмотрены основные схемы полирования профиля лопаток турбины ГТД полировальными кругами с учетом особенностей геометрии профиля. Было установлено, что при полировании входной и выходной кромок пера возникают существенные максимальные напряжения, величина которых может изменяться в несколько раз, по сравнению с напряжениями, возникающими в других точках профиля ЛТ ГТД, что обусловлено существенным различием участков на входной и выходной кромках, а также на спинке и корытце соответственно. Как следствие – наличие таких неравномерностей при обработке может негативно отразиться на качестве отделочной обработки. На основе контактной задачи Герца, определено влияние сложной пространственной геометрии лопаток турбины ГТД на непостоянство профиля и размеров пятна контакта при различных схемах полировании и возникающие при этом максимальные контактные напряжения. На основе результатов компьютерного моделирования определены изменения максимальных контактных напряжений при изменении обрабатываемого радиуса профиля для рассматриваемых схем обработки и разработана блок-схема процесса адаптации режимов обработки с учетом сложного криволинейного профиля пера.

Ключевые слова: перо, профиль, лопатка, усилия, напряжения.

A. N. Mikhaylov, A. V. Anastasyev, N. S. Pichko

ENSURING THE CONSTANT CONTACT LOAD WHEN POLISHING A COMPLEX PROFILE OF THE GTE TURBINE BLADE FLADE

The article considers the main schemes for polishing the profile of GTE turbine blades with polishing wheels, taking into account the features of the profile geometry. It was found that when polishing the input and output edges of the feather, significant maximum stresses arise, the value of which can change several times, compared with the stresses that occur at other points of the GTE LT profile, which is due to a significant difference in the areas on the input and output edges, as well as on the back and trough, respectively. As a result, the presence of such unevenness during processing can adversely affect the quality of the finishing treatment. On the basis of the Hertz contact problem, the influence of the complex spatial geometry of the GTE turbine blades on the variability of the profile and size of the contact spot for various polishing schemes and the resulting maximum contact stresses are determined. Based on the results of computer simulation, changes in the maximum contact stresses were determined with a change in the processed radius of the profile for the considered processing schemes, and a block diagram of the process of adapting processing modes was developed, taking into account the complex curvilinear profile of the pen.

Keywords: vane, profile, blade, effort, stress.

1. Введение

Полирование является завершающим этапом обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя (ЛТ ГТД). Лопатки характеризуются сложной пространственной формой пера, шероховатость которого должна находиться в пределах $Ra=0,32...0,8$ мкм, а допуск на сложный фасонный профиль в пределах $0,01...0,05$ мм [1]. Отклонение геометрических форм, размеров и параметров качества поверхности профиля пера лопатки от расчетных ухудшает рабочие характеристики двигателя, приводит к потере мощности, уменьшению КПД и снижению экономичности двигателя [2] Все эти факторы в целом существенно затрудняют автоматизированную обработку, в следствие чего

© Михайлов А. Н., Анастасьев А. В., Пичко Н. С.; 2023

процессы отделочной обработки как у нас в стране, так и за рубежом, носят преимущественно ручной характер [1, 2, 3]. Одним из активно применяемых способов отделочной обработки является полирование на полировальных бабках, с применением в качестве инструмента специальных войлочных кругов с накатанными на профиль абразивными зернами, или микропорошков [2, 4]. Эти процессы разделяют на такие переходы как предварительное и окончательное полирование, а также глянцеование [5].

При этом, соблюдение постоянства режимов обработки зависит от уровня квалификации рабочего, т.к. такие параметры как усилие прижима, длительность полирования в каждой точке поверхности, угол касания и т.д. могут быть непостоянными на различных участках профиля [5, 6]. Это приводит к тому, что процесс обработки характеризуется непостоянными технологическими воздействиями, вследствие чего определенные участки готового изделия имеют локальные зоны, характеризующиеся более низким качеством обработанной поверхности, либо же процесс обработки существенно увеличивается из-за применения нерациональных режимов резания. С учетом и без того очень сложных условий эксплуатации, которым подвергаются лопатки турбины в процессе работы, таким как переменные нагрузки, действие высокотемпературного газового потока, содержащего мельчайшие твердые частицы, наличие дополнительных вышеупомянутых участков может приводить к ускоренному выходу из строя ЛТ ГТД.

Целью данной работы является обеспечение постоянства режимов обработки при полировании лопатки турбины ГТД за счет адаптации режимов обработки с учетом сложного криволинейного профиля пера.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: провести анализ особенностей схем обработки сложного криволинейного профиля ЛТ ГТД, разработать математические модели взаимодействия полировального круга и поверхности пера в зоне контакта, разработка рекомендаций по обеспечению постоянства режимов обработки по всему периметру сложного криволинейного профиля. Эти задачи решаются в данной работе.

2. Основное содержание и результаты работы

Процесс полирования лопаток турбин в большей степени выполняется в ручном режиме, что обусловлено их сложной пространственной формой и особенностями технологии. При этом, в процессе полирования задействован различный инструмент и схемы обработки, такие как: полирование кругами различных профилей, полирование лентами и т.д. В данной работе рассматриваем только полирование кругами, при котором можно выделить три основные схемы обработки, которые охватывают основные типоразмеры лопаток – представленные на рисунке 1. Так, при полировании спинки пера активно применяются круги прямого профиля, позволяющие обрабатывать большую площадь поверхности, при этом радиус инструмента превышающим радиус обрабатываемой лопатки $R_{\text{п}} > R_{\text{л}}$ (рис. 1, а); при обработке корытца пера лопаток последних ступеней турбины или свободной турбины возможно применение круга, радиус которого меньше чем радиус обрабатываемой лопатки $R_{\text{п}} < R_{\text{л}}$ (рис. 1, б), а в случае обработки корытца пера лопаток первых ступеней турбины, обработку ведут фасонным полировальным кругом, радиус скругления которого меньше чем обрабатываемый радиус корытца $R_{\text{п}} < R_{\text{л}}$ (рис. 1, в) [7].

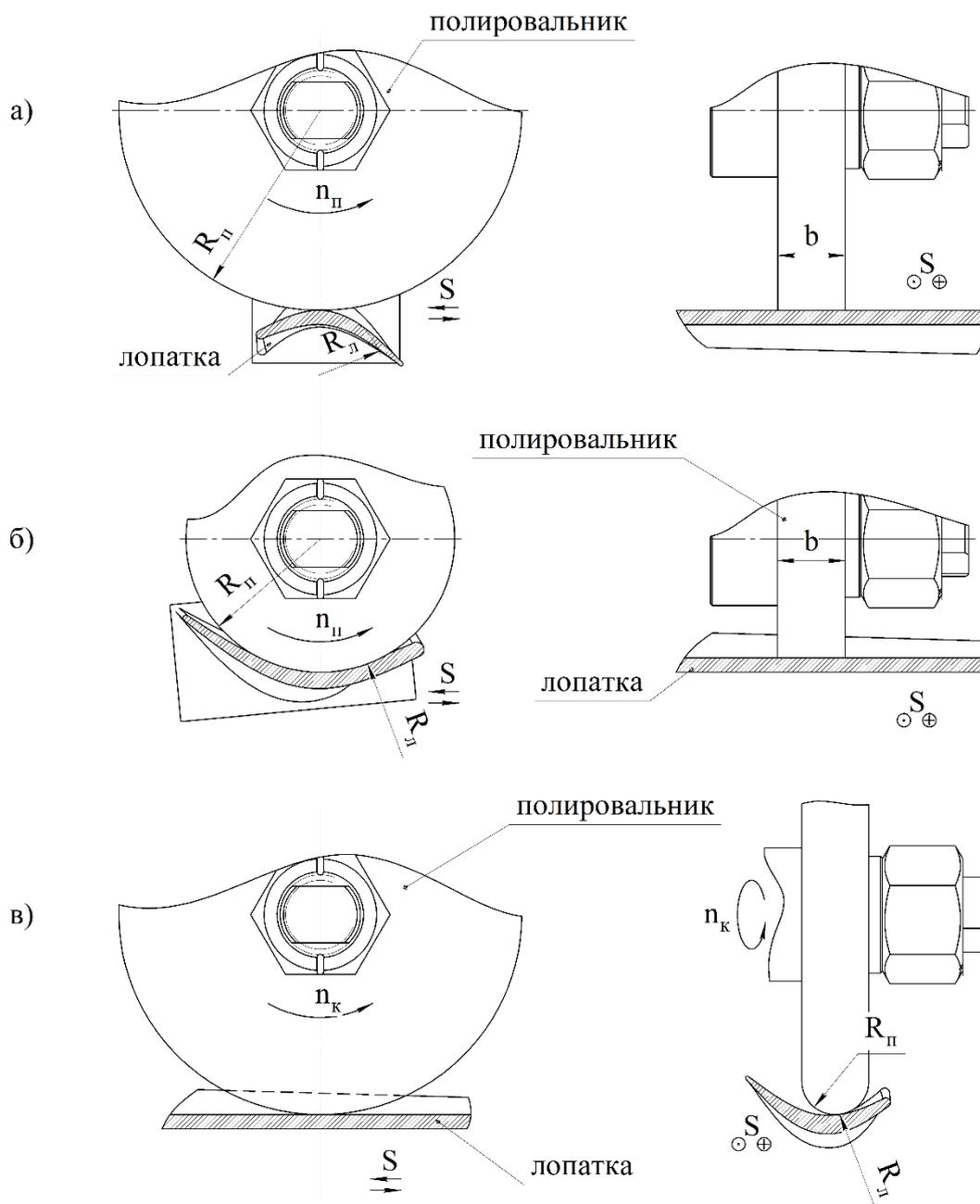


Рисунок 1. Основные схемы окончательной обработки элементов пера лопатки: а) обработка поверхности спинки лопатки; б) обработка корытца кругом, превышающим радиус обрабатываемой лопатки; в) обработка корытца кругом, радиус которого меньше обрабатываемого радиуса корытца

Адаптация режимов обработки, с учетом особенностей конструкции обрабатываемого изделия является одним из основных положений функционально-ориентированных технологий (ФОТ). С точки зрения ФОТ [8] каждому функциональному элементу ЛТ ГТД необходимо сообщить соответствующие функциональные воздействия, которые позволят в наиболее полной мере соответствовать действующим на него эксплуатационным воздействиям. Таким образом, для решения поставленной цели актуально применение ФОТ.

Несмотря на существующие различные схемы отделочной обработки, все они характеризуются существенным изменением режимов обработки по длине профиля пера, что вызвано его сложной геометрией. Например, если рассматривать одно сечение профиля пера, то величина радиуса спинки может быть в 10...50 раз больше радиуса входной кромки, что в свою очередь окажет непосредственное влияние на величину пятна контакта, а следовательно, и на удельное давление при обработке. Результатом этого является изменение контактных напряжений в зоне обработки. Проблему обеспечения постоянства контактных напряжений при обработке решаем в данной работе.

Для решения поставленной проблемы необходимо знать сущность происходящего процесса обработки в каждой точке профиля, который имеет сложную пространственную геометрию на всей длине пера лопатки. Решение данной проблемы требует

понимания механизма протекающего процесса, для чего необходимо знать условия контакта.

Как видно из схем обработки, представленных на рис. 1 – при обработке параметры как инструмента, так и обрабатываемой заготовки варьируются в широких пределах, что должно быть обязательно учтено при определении параметров в зоне обработки, что непосредственно отразится на изменении пятна контакта при обработке, а следовательно, и на контактных напряжениях.

Таким образом, можно выделить следующие особенности, возникающие при обработке профиля ЛТ ГТД:

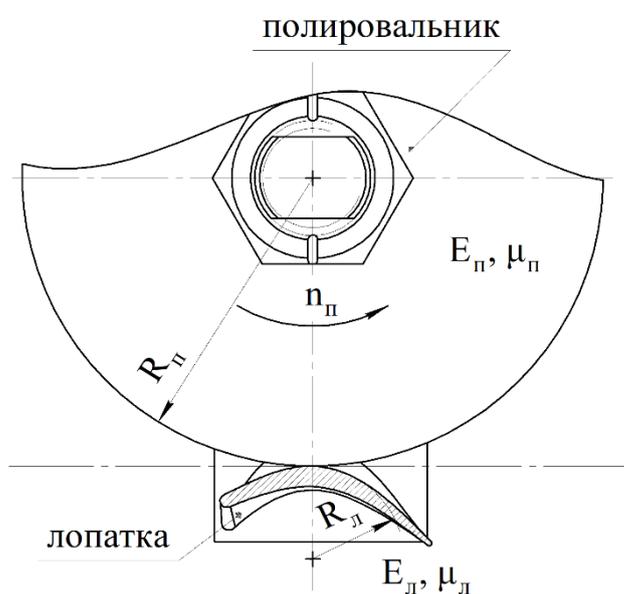


Рисунок 2. Параметры процесса полирования в зоне резания

1. Обработка корыта и спинки лопатки проходит в различных условиях, так как поверхность корыта выступает в роли лимитирующего фактора, ограничивающего радиус инструмента, и определяющего схему обработки.

2. Сложный криволинейный профиль лопатки турбины характеризует неравномерность режимов обработки как по разным конструктивным элементам профиля (спинке, корыту, входной и выходной кромкам), так и по различным сечениям пера в целом.

3. Изменяющиеся при обработке условия контакта инструмента и пера лопатки характеризуются переменным пятном контакта и удельными усилиями прижатия.

Всё вышперечисленные особенности приводят к тому, что на поверхности профиля могут образовываться участки, характеризующиеся более низким качеством обработанной поверхности, либо же со следами прижогов и полировальных дефектов, что приведет к ухудшению свойств готового изделия.

Для решения поставленной задачи применима задача о контактных напряжениях Герца. Следует отметить, что распределение контактной нагрузки по Герцу описано в справочной литературе и для основных схем выведены формулы расчета [6], полученные при следующих предположениях:

1. Напряжения в зоне контакта не превышают предела упругости;
2. Площадки контакта малы, по сравнению с поверхностями соприкасающихся тел;
3. силы давления, распределенные по поверхности контакта, нормальны к этой поверхности [9,10].

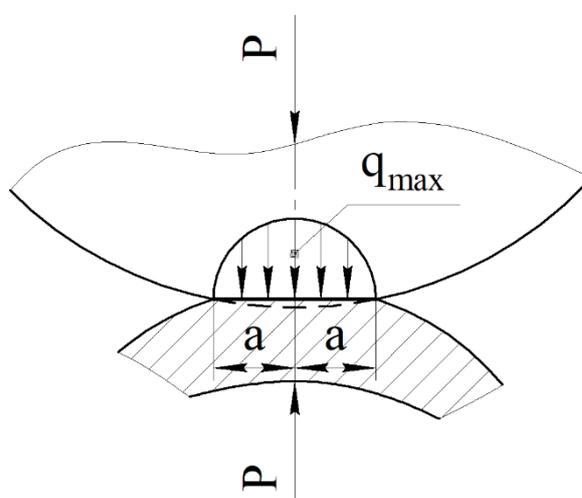


Рисунок 3. Характеристики контакта при решении задачи Герца

Параметры процесса полирования профиля лопатки представлены на рис. 2, где E_n, E_l – модуль упругости материала полировальника и лопатки соответственно, μ_n, μ_l – соответствующие коэффициенты Пуассона, R_n – радиус полировальника, R_l – радиус профиля лопатки в рассматриваемый момент контакта. При этом, под действием удельной нагрузки P (рис. 3) произойдет деформация профилей в зоне контакта полировальника и профиля лопатки, которая приведет к увеличению параметров контактной площадки [9].

Для расчетной схемы, представленной на рис. 1а, состоящей из различных материалов лопатки и полировальника, величину полуширины контактной площадки b можно определить по формуле [9]:

$$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_n R_l}{R_n + R_l} \left(\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_l^2}{E_l} \right)}, \quad (1)$$

Максимальное напряжение в зоне контакта будет равно [9]:

$$q_{max} = 0,5642 \sqrt{\frac{P}{l} \left(\frac{\frac{R_n + R_l}{R_n R_l}}{\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_l^2}{E_l}} \right)}, \quad (2)$$

Для расчетных схем, представленных на рис. 1б и рис. 1в формулы определения величины полуширины контактной площадки и максимального напряжения в зоне контакта приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные соотношения при определении характеристик контакта

Расчетная схема, рис.1	Ширина контактной площадки, мм	Максимальное напряжение в зоне контакта
а)	$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_n R_{\pi}}{R_n + R_{\pi}} \left(\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}} \right)}$	$q_{max} = 0,5642 \sqrt{\frac{P}{l} \left(\frac{\frac{R_n - R_{\pi}}{R_n R_{\pi}}}{\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}}} \right)}$
б)	$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_n R_{\pi}}{R_n - R_{\pi}} \left(\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}} \right)}$	$q_{max} = 0,5642 \sqrt{\frac{P}{l} \left(\frac{\frac{R_n + R_{\pi}}{R_n R_{\pi}}}{\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}}} \right)}$
в)	$a = 1,145 n_a \sqrt{\frac{P}{2R_n - R_{\pi}} \frac{R_n R_{\pi}}{\left(\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}} \right)}}$ $b = 1,145 n_b \sqrt{\frac{P}{2R_n - R_{\pi}} \frac{R_n R_{\pi}}{\left(\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}} \right)}}$	$q_{max} = 0,365 n_p \sqrt{\frac{\left(\frac{2R_n - R_{\pi}}{R_n R_{\pi}} \right)^2}{\left(\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}} \right)^2}}$

Где n_a и n_b – коэффициенты уравнения эллипса касания, приведенные в таблицах [9].

Следует отметить, что исходя из приведенных уравнений на удельное усилие прижатия будут влиять как максимальные контактные напряжения в точке контакта, так и радиус профиля пера ЛТ ГТД. Исходя из особенностей конструкции, радиус профиля всегда будет переменным, а максимальные контактные напряжения, для решения поставленной задачи, должны иметь постоянное значение – из уравнения (2) получим формулу, для нахождения удельного усилия прижатия в рассматриваемой точке:

$$P = \frac{q_{max}^2}{0,318 \left(\frac{\frac{R_n + R_{\pi}}{R_n R_{\pi}}}{\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}}} \right)}, \tag{3}$$

Аналогично, для расчетных схем рис. 1б, и рис. 1в полученные формулы будут соответственно:

$$P = \frac{q_{max}^2}{0,318 \left(\frac{\frac{R_n - R_{\pi}}{R_n R_{\pi}}}{\frac{1 - \mu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \mu_{\pi}^2}{E_{\pi}}} \right)}, \tag{4}$$

$$P = \frac{q_{max}^3}{0,365^3 n_p^3 \frac{(2R_d - R_n)^2}{R_d R_n} \left(\frac{1 - \mu_d^2}{E_d} + \frac{1 - \mu_n^2}{E_n} \right)^2}, \tag{5}$$

Задавшись такими исходными данными, как усилие прижима лопатки к полировальнику 100 Н [11] и переменным радиусом профиля лопатки, в пределах от 1 до 100 мм, и подставив их в уравнения (3), (4) и (5) получили следующие зависимости максимальных контактных напряжений, в зависимости от обрабатываемого радиуса лопатки (рис. 4). Радиусы профиля лопатки для схем б) и в) не рассматривались со значениями менее 20 мм, в связи с тем, что конструктивно на профиле корытца они не применяются.

Приведенный график наглядно демонстрирует, что при существенном уменьшении обрабатываемого радиуса заготовки значительно возрастают максимальные контактные напряжения, при одинаковом усилии прижима. Это объясняется существенным уменьшением пятна контакта, при обработке таких участков. Как говорилось ра-

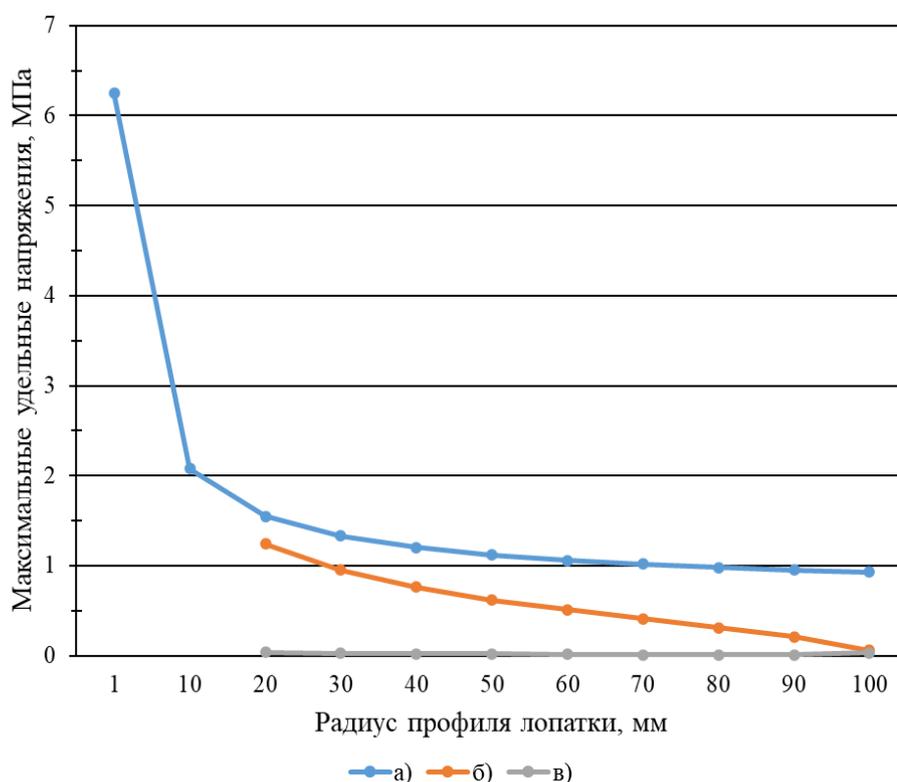


Рисунок 4. График изменения максимальных контактных напряжений при изменении обрабатываемого радиуса профиля для рассматриваемых схем обработки

нее, отделочная обработка лопаток в большинстве случаев проводится в ручном режиме, что существенно усложняет как контроль, так и воспроизведение требуемых режимов обработки.

В соответствии с поставленной целью, для обеспечения постоянства процесса обработки, необходима адаптация режимов обработки, а именно усилия прижима, при обработке криволинейного сложного профиля пера лопатки. При этом, для процесса

адаптации режимов обработки необходимо знать: размеры профиля пера в различных сечениях, исходные режимы обработки, которые лягут в основу и применяемую технологию обработки. Зная эти параметры, на основании уравнений (3), (4), (5), в зависимости от применяемых схем обработки, можно определить граничные условия, ограничивающие применение исходных режимов обработки. Далее следует процесс выявления характерных зон, с подобными условиями процесса обработки, и определение режимов полирования, с учетом сформированных ранее граничных условий. Графически, данный процесс можно представить в виде алгоритма, приведенного на рис. 5.

На основе приведенных результатов, полученных с помощью компьютерного



Рисунок 5. Блок-схема процесса адаптации процесса при обработке сложного криволинейного профиля ЛТ ГТД

моделирования, можно утверждать, что при обработке сложного пространственного профиля в характерных точках каждого сечения наблюдаются существенные изменения в протекающих процессах полирования, что обусловлено переменной шириной пятна контакта и изменяющимся удельным давлением. При этом, эти изменения необходимо учитывать при разработке технологического процесса отделочной обработки, для обеспечения требуемого результата. Так, при реализации функционально-ориентированного технологического процесса, при определении функциональных воздействий в каждой точке профиля пера, необходимо учитывать изменения пятна контакта и, следовательно, возникающих максимальных напряжений, обусловленные особенностями геометрии ЛТ ГТД.

3. Заключение

Таким образом, на основании анализа особенностей схем обработки сложного криволинейного профиля ЛТ ГТД, и существующих частных вариантов решения контактной задачи Герца, получили:

- расчетные схемы для наиболее распространенных операций полирования дисковыми полировальниками профиля пера;
- уравнения для определения требуемого усилия прижима заготовки, в процессе полирования, для обеспечения постоянства контактных напряжений в процессе обработки;
- влияние переменного радиуса профиля пера, на изменение максимальных контактных напряжений для каждой из приведенных схем;

- характерные зоны профиля, при обработке которых возникают максимальные контактные напряжения.

При отделочной обработке ЛТ ГТД наблюдается существенное изменение возникающих максимальных напряжений, обусловленное сложным профилем и переменными удельными усилиями прижима. Проектирование технологического процесса с учетом этого непостоянства позволит обеспечить более равномерную обработку поверхности, без увеличения длительности обработки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток / Р. М. Мубаракшин, М. Д. Дическул, Н. Н. Николаев [и др.] // *Авиационные двигатели*. – 2021. – № 4(13). – С. 51-62. – DOI 10.54349/26586061_2021_4_51. – EDN YGFKKK.

2. Макаров, В. Ф. Оптимизация процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В. Ф. Макаров, Е. Н. Бычина // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 4-3(288). – С. 41-47. – EDN ТКСНКВ.

3. Наукоемкие технологии в машиностроении / А. Г. Суслов, Б. М. Базров, В. Ф. Безъязычный и др.; под ред. А. Г. Суслова. – Москва: Машиностроение, – 2012. – 528 с. – ISBN 978-5-94275-619-2.

4. Макаров, В. Ф. Разработка высокоэффективных технологических процессов обработки деталей газотурбинных двигателей для авиации и наземных установок / В. Ф. Макаров // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева*. – 2017. – № 1(40). – С. 159-166. – EDN YOYBXN.

5. Макаров, В. Ф. Проблемы автоматизации финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток ГТД / В. Ф. Макаров, В. А. Жукотский, Е. Н. Бычина // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2016. – № 8-2. – С. 52-55. – EDN WLXUTT.

6. Михайлов, Д. А. Некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток ГТД из титановых сплавов / Д. А. Михайлов // . – 2014. – № 3(49). – С. 120-127. – EDN TPNXPT.

7. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей / А. Г. Бойцов, А. П. Ковалев, А. С. Новиков [и др.]. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2007. – 584 с. – ISBN 978-5-7038-3044-4. – EDN ZCLDPD.

8. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов; Д. А. Михайлов. – Донецк: Технополис, 2009. – 346 с. – ISBN 9667907244.

9. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с. – ISBN 5-12-000299-4.

10. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – Москва: Машиностроение, 1993. – 640 с. – ISBN 5-217-01304-0.

11. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. – Минск: «Наука и техника», 1976. – 328 с.

Поступила в редколлегию 05.02.2023 г.