

УДК 621.795:621.92

Д.А. Михайлов, аспирант  
Донецкий национальный технический университет, Украина  
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [arasamogon@mail.ru](mailto:arasamogon@mail.ru)

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛИРОВКИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК ГТД ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

*В статье приведены данные о некоторых особенностях полировки криволинейных поверхностей лопаток авиационных двигателей. Представлено описание физической сущности процесса полирования лопаток и особенности обработки их криволинейных поверхностей. А также разработаны математические модели взаимодействия инструмента и поверхности лопатки. В данной работе представлены результаты и даны рекомендации полировки лопаток.*

**Ключевые слова:** лопатка, авиационный двигатель, полировка, процесс, технология.

### 1. Введение

Эксплуатационные свойства авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) определяются параметрами качества лопаток компрессора, которые испытывают значительные знакопеременные и циклические нагрузки, эрозионно-коррозионные воздействия в процессе работы [1, 2]. Для обеспечения заданных параметров качества лопаток компрессоров ГТД применяется множество различных технологических методов [3, 4]. При этом на отделочных операциях технологического процесса применяется полирование поверхностей лопатки. Вместе с тем, полирование поверхностей лопатки имеет определенные технологические особенности. Это обусловлено, прежде всего, тем, что материалом лопатки являются титановые сплавы, которые относятся к труднообрабатываемым материалам. А также тем что, обрабатываемые поверхности имеют сложную криволинейную форму, определяемую поверхностями корыта и спинки лопатки, имеющую переменный радиус кривизны. Поэтому вопросы полировки криволинейных поверхностей лопатки из титановых сплавов ГТД требуют дальнейших исследований для создания методов повышения качества обработки и соответственно увеличения ресурса и надежности ГТД в целом.

Целью данной работы является повышение качества криволинейных поверхностей ГТД из титановых сплавов на основе установления механизма полировки и определения схем взаимодействия инструмента и поверхности лопатки.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: исследовать физическую сущность и механизм процесса полирования криволинейных поверхностей лопатки; установить особенности обработки и схемы взаимодействия инструмента и криволинейных поверхностей лопатки; разработать математические модели взаимодействия инструмента и поверхности лопатки; представить основные рекомендации процесса полирования криволинейных поверхностей лопатки. Эти задачи решаются в данной работе.

### 2. Физическая сущность и механизм процесса полирования поверхностей лопатки

При полировании рабочих поверхностей лопатки из титановых сплавов высокая точность процесса формообразования и параметры шероховатости достигаются посредством применения соответствующего инструмента, полировальных паст, режимов обработки, кинематической структуры и жесткости оборудования, а также прогрессивных методов обработки. Для повышения точности и параметров шероховатости поверхностей лопатки при полировании выполняют дифференциацию процесса на следующие перехо-

ды: предварительное полирование, окончательное полирование и глянцеование (зеркальное полирование). Физическая сущность процесса полирования поверхностей различных изделий рассмотрены в ряде работ [5, 6, 7, 8]. Вместе с тем, полирование поверхностей лопатки из титановых сплавов требует дальнейших исследований.

Процесс полирования поверхностей лопатки из титановых сплавов реализуется за счет следующих типов технологических воздействий.

1. Резания материала поверхности абразивными зёрнами, приводящего к образованию диспергированного (размельченного) рельефа поверхностного слоя.
2. Пластической деформации микрорельефа полируемой поверхности.
3. Химического воздействия поверхностно-активных полирующих веществ (углеводородов, кислот, солей кислот и их соединений и тому подобных веществ).
4. Термического воздействия на макро- и микроуровнях.

Можно отметить, что приведенные выше технологические воздействия при полировании реализуются в едином комплексе. При этом отдельные типы технологических воздействий могут преобладать или действовать незначительно. Например, при предварительном полировании действуют все типы технологических воздействий, причем преобладает резание материала. При окончательном и зеркальном полировании, влияние процесса резания снижается соответственно, и относительно возрастает действие пластических и химических воздействий.

На рис. 1 представлена системная модель процесса технологических преобразований свойств поверхностного слоя лопатки при полировании. Здесь показано, что преобразование начальных свойств  $V$  полируемой поверхности лопатки в конечные свойства  $W$  реализуются посредством процесса технологических преобразований свойств поверхностного слоя лопатки при обработке на базе действия потоков материи  $M$ , энергии  $E$  и информации  $I$ , формируемых технологическими воздействиями четырех типов. Процесс полирования лопаток может выполняться за счет нескольких переходов: 1 – предварительное полирование, 2 – окончательное полирование, 3 – глянцеование (зеркальное полирование). Параметры качества обработки поверхностей лопатки на каждом переходе определяются припусками, режимами обработки, параметрами полирующего круга и полирующего материала, а также особенностями обработки. Именно эти особенности обработки лопаток ГТД оказывают существенное влияние на параметры качества их поверхностей. Поэтому далее рассмотрим более детально основные особенности обработки поверхностей лопатки.

### **3. Особенности обработки и схемы взаимодействия инструмента и криволинейных поверхностей лопатки**

Одной из главных особенностей полирования лопатки ГТД является то, что перо лопатки состоит из криволинейной внутренней и внешней поверхности, а именно корыта и спинки, которые имеют переменные радиусы кривизны. При этом полирующий круг имеет постоянные радиусы кривизны, как в продольном, так и поперечном сечении. Поэтому при взаимодействии инструмента, имеющего постоянные радиусы кривизны режущей поверхности, и поверхности лопатки с переменным радиусом кривизны обрабатываемой поверхности, происходит переменный процесс резания. Кроме того, процесс резания ухудшается тем, что лопатка имеет внутренние и внешние поверхности, которые также приводят к возникновению переменных параметров процесса резания на поверхности корыта и спинке. Все это снижает параметры качества рабочих поверхностей пера лопатки.

На рис. 2 представлены схемы обработки поверхностей лопатки ГТД (вид сбоку). На рис. 2,а – обработка корыта лопатки при  $r_{11} < r_{21}$ ; на рис. 2,б – обработка корыта лопатки при  $r_{11} < r_{21}$  в случае, когда радиусы кривизны инструмента и лопатки почти равны; на рис. 2,в – обработка спинки лопатки. Здесь показано: 1 – полировальный круг; 2 – лопатка;  $\omega$  – угловая скорость вращения круга;  $s$  – подача лопатки;  $\gamma_0$  – половина угла зоны резания;  $r_{11}$  – радиус кривизны круга в осевом сечении;  $r_{21}$  – радиус кривизны поверхности лопатки в зоне резания в продольном сечении.



Рис. 1. Системная модель процесса технологических преобразований свойств поверхностного слоя лопатки при полировании

резания возникают при обработке поверхности корыта из-за того, что контакт инструмента и поверхности лопатки внутренний, а также поверхность корыта образована с изменяющимся радиусом кривизны. Это приводит к значительному изменению длины зоны контакта  $ab$  в продольном сечении инструмента (рис. 2,б). Особенно значительно это влияние происходит в случае, когда радиусы кривизны инструмента  $r_{11}$  и поверхности лопатки  $r_2$  почти равны. В этом случае, нагрузка прикладывается постоянная, а пятно контакта имеет переменные параметры из-за изменяющейся дуги контакта  $ab$  в зоне резания (рис. 2). Это приводит к возникновению неравномерного удельного давления в зоне резания.

Также можно заметить, что такие же процессы неравномерности обработки происходят и в поперечном сечении инструмента. На рис. 3 представлены схемы обработки поверхностей лопатки ГТД (вид спереди). На рис. 3,а – обработка корыта лопатки;

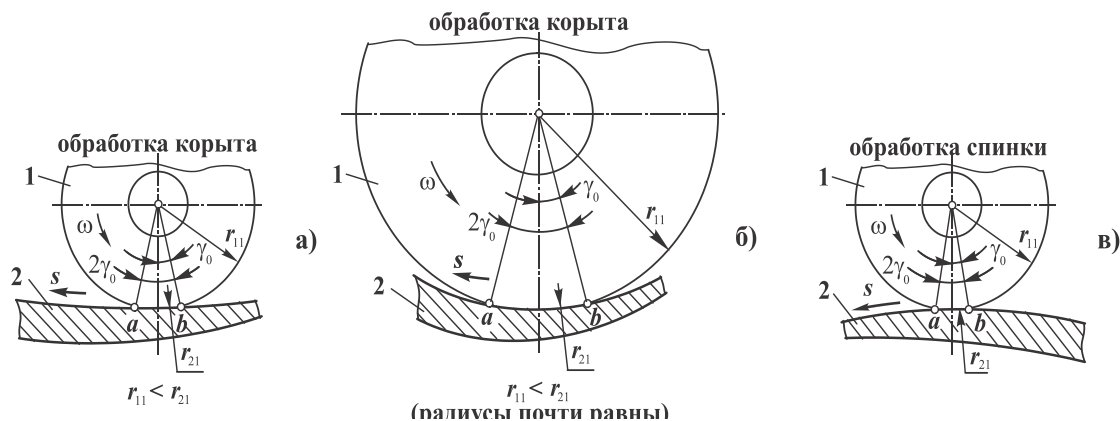


Рис. 2. Схемы обработки поверхностей лопатки ГТД (вид сбоку):

а – обработка корыта лопатки при  $r_{11} < r_{21}$ ; б – обработка корыта лопатки при  $r_{11} < r_{21}$  в случае, когда радиусы кривизны инструмента и лопатки почти равны; в – обработка спинки лопатки

на рис. 3,б – обработка спинки лопатки. Здесь цифрами обозначены позиции, аналогичные рис. 2. А также на рис. 3 показано:  $r_{12}$  – радиус кривизны инструмента в поперечном сечении;  $r_{22}$  – радиус кривизны поверхности лопатки в поперечном сечении.

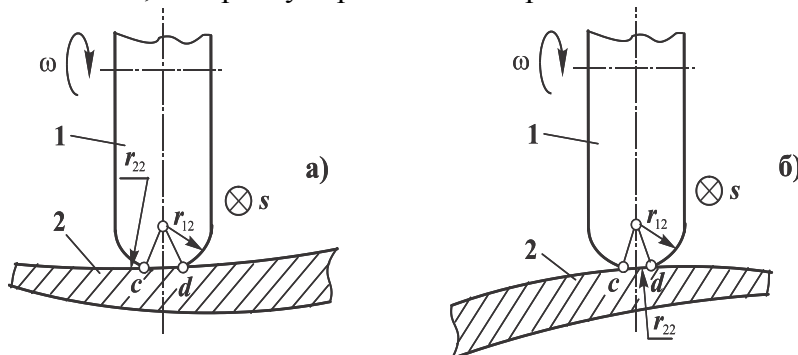


Рис. 3. Схемы обработки поверхностей лопатки ГТД (вид спереди):

**а** – обработка корыта; **б** – обработка спинки.

Можно отметить, что в поперечном сечении зоны обработки, из-за неравномерного радиуса кривизны поверхностей лопатки и особенностей обработки внутренних и внешних поверхностей лопатки, также происходит возникновение не-

равномерных удельных контактных нагрузок.

Таким образом, в процессе полирования рабочих поверхностей лопатки возникают следующие особенности обработки:

1. Обработка основных поверхностей лопатки, а именно поверхности корыта и поверхности спинки, ведется в различных условиях из-за того, что при обработке корыта образуется внутренний контакт с инструментом, а при обработке спинки – внешний.

2. Обработка каждой поверхности пера лопатки обусловлена наличием переменного радиуса кривизны в различных точках поверхности и возникновением изменяющихся параметров удельной контактной нагрузки.

3. При обработке поверхности корыта пера лопатки возникают значительные перепады значений контактной нагрузки из-за вхождения инструмента в зоны, где радиус кривизны обрабатываемой поверхности лопатки и инструмента близки по своим значениям.

На рис. 4. представлен эпюр удельной контактной нагрузки на поверхности лопатки, возникающий от действия инструмента. Здесь цифрами показано: 1 - обрабатываемая поверхность лопатки, 2 – эпюр контактной нагрузки, возникающий от действия инструмента на поверхность лопатки.

Все выше перечисленные особенности приводят к возникновению неравномерных удельных контактных давлений при полировании поверхностей лопатки и снижению параметров качества лопаток ГТД в целом. Поэтому вопросы определения удельных нагрузок в зоне контакта полировального инструмента и поверхностей лопатки имеет важное значение для повышения точности процесса формообразования поверхностей корыта и спинки лопатки, а также параметров шероховатости и других свойств поверхностного слоя.

#### **4. Математические модели взаимодействия инструмента и поверхности лопатки**

Проведенные исследования особенностей контакта инструмента и поверхностей пера лопатки при полировании позволил установить варианты их взаимодействия, которые представлены в табл. 1.

Анализируя варианты взаимодействия поверхностей и особенности распределения нагрузки по пятну контакта инструмента и поверхности лопатки, представленные в табл. 1, можно отметить, что при обработке поверхности спинки лопатки существует один их

вариант взаимодействия (внешний – внешний контакт), характеризуемый распределением контактной нагрузки, которое можно описать распределение Герца, как по образующей, так и по направляющей лопатки. Здесь один вид контакта между поверхностями, однако, в наличии изменяющиеся радиусы кривизны поверхности в направлении образующей и в направлении направляющей линий лопатки. Поэтому обработка поверхности спинки характеризуется постоянством вида контакта по всей поверхности, но изменяющимся радиусом кривизны поверхности спинки лопатки. В этом случае, распределение нагрузки по пятну контакта будет характеризоваться законом Герца, как по образующей, так и по направляющей поверхности спинки лопатки. Можно отметить, что распределение контактной нагрузки по Герцу достаточно хорошо описано в современной литературе и разработаны формулы для инженерных расчетов [9, 10].

Таблица 1. Особенности контактирования полировального круга с поверхностями лопатки и распределения удельной нагрузки по пятну контакта

№ п\п	Наименование обрабатываемой поверхности пера лопатки	Вид контакта по исполнительной линии		Тип распределения удельной нагрузки по пятну контакта	
		образующая	направляющая	образующая	направляющая
1	Спинка	внешний	внешний	по Герцу	по Герцу
2	Корыто	1-й вариант контактирования			
		внутренний	внешний	по Герцу	по Герцу
		2-й вариант контактирования			
		внутренний	внутренний	по Герцу	по Герцу
3-й вариант контактирования					
	внутренний (радиусы почти равны)	внутренний	по Штайерману	по Герцу	

При полировании поверхности корыта мало того, что имеется переменный радиус кривизны обрабатываемой поверхности, возникают три варианта контактирования инструмента и поверхности (табл. 1). Эти особенности приводят к возникновению больших неравномерностей процесса обработки и снижению параметров качества обработки. Поэтому поверхность корыта обрабатывать более сложно по сравнению с поверхностью спинки пера лопатки.

Можно отметить, что при распределении контактной нагрузки в соответствии с

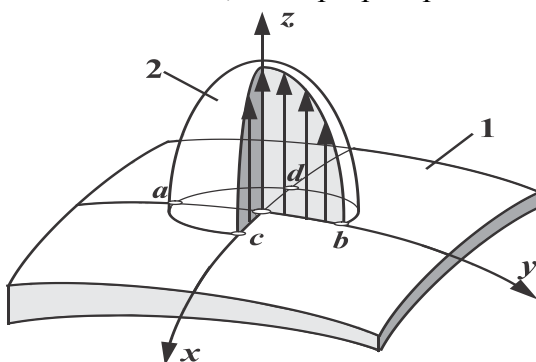


Рис. 4. Эпюр удельной контактной нагрузки на поверхности лопатки от действия инструмента

законом Герца внутреннего и внешнего контакта достаточно хорошо изучены в современной литературе, поэтому эти вопросы не будем детально рассматривать.

При распределении нагрузки по Штайерману – Герцу (табл. 1) могут происходить значительные изменения удельного давления, которые приводят к снижению качества

поверхности лопатки. В этом случае удельная нагрузка по образующей распределяется в соответствии с законом Штайермана, а по направляющей - по Герцу. Эти вопросы мало исследованы и требуют дальнейшего изучения, поэтому рассмотрим более детально эти вопросы.

Используя закон распределения контактной нагрузки, действующий по образующей в соответствии с распределением Штайермана [9], а по направляющей – по Герцу [10] можно записать следующую систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} 2(v_1 r_{11} + v_2 r_{21}) \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) \cos(\gamma - \gamma^1) \ln \operatorname{tg} \frac{|\gamma - \gamma^1|}{2} d\gamma^1 - (x_1 r_{11} + x_2 r_{21}) \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) \sin|\gamma - \gamma^1| d\gamma^1 + \\ + 2v_1 r_{11} \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) d\gamma^1 = (r_{21} - r_{11})(1 - \cos \gamma) - y \cos \gamma; \\ -\gamma_0 < \gamma < \gamma_0; \\ P_i = 3,636\pi \frac{r_{11} r_{12}}{E} \int_0^\gamma p^2(\gamma) \cos \gamma d\gamma, \end{aligned} \right\} (1)$$

где

$$v_1 = \frac{\lambda_1 + 2\mu_1}{4\pi\mu_1(\lambda_1 + \mu_1)}, \quad v_2 = \frac{\lambda_2 + 2\mu_2}{4\pi\mu_2(\lambda_2 + \mu_2)},$$

$$x_1 = \frac{1}{4(\lambda_1 + \mu_1)}, \quad x_2 = \frac{1}{4(\lambda_2 + \mu_2)}.$$

Здесь:  $\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2$  - упругие постоянные контактирующих поверхностей инструмента и лопатки;

$E$  – модуль упругости;

$P_i$  – нагрузка, прикладываемая к инструменту;

$\gamma$  - угол до рассматриваемой точки в области контакта.

Решение этой задачи сводится к решению интегродифференциального уравнения Прандтля, метод, решения которого предложен Векуа [9]. Оно сводится к замене одной из функций приближенным выражением, однако решение такого уравнения получается в замкнутом виде и полученные определенные интегралы не выражаются в явном виде. Поэтому решение этой системы уравнений выполняется методом конечных разностей.

Разобьем интервал  $0, \gamma_0$  в системе (1) на  $n$  равных частей и будем считать, что в каждом из полученных подинтервалов функция  $p(\gamma)$  сохраняет постоянное значение:

$$p(\gamma) = p_k, \quad (k-1)v < \gamma < kv,$$

$$k = 1, 2, \dots, n, \quad v = \frac{\gamma_0}{n}.$$

Учитывая, что в системе (1) функции четные, можно положить:

$$\gamma = lv, \quad (l = 1, 2, \dots, n).$$

Тогда, проделав ряд соответствующих преобразований, решение сводится к использованию метода конечных разностей. Сглаживая получаемые при этом ступенчатые эпюры распределения удельной контактной нагрузки, получим эпюры, определяемый интегральной системой уравнений (1).

## 5. Результаты и основные рекомендации

Для повышения качества рабочей криволинейной поверхности пера лопатки ГТД с изменяющимся радиусом ее кривизны ГТД и повышения точности обработки необходимо учитывать следующие особенности обработки:

1. Для исключения условий, когда радиусы кривизны полирующего круга и обрабатываемой поверхности по своим размерам почти равны, необходимо обеспечивать радиус полирующего круга в продольном сечении следующих размеров  $r_{11} = (0,7 - 0,8) r_{21 \min}$ , где  $r_{21 \min}$  - минимальный радиус кривизны обрабатываемой поверхности лопатки. В этом случае контактная нагрузка при полировании будет изменяться не значительно. Следует заметить, что в условиях, когда радиусы кривизны полирующего круга и обрабатываемой поверхности по своим размерам почти равны, возникают значительные перепады удельных давлений из-за перераспределения контактного давления на большие размеры площадки контакта. При этом при переходе из режима обработки, когда радиусы кривизны почти равны в обычные условия обработки, когда радиусы кривизны имеют различие, происходит значительное изменение удельной нагрузки, что ведет к изменению свойств (параметров шероховатости) поверхности лопатки. Это ведет к снижению параметров качества рабочих поверхностей лопатки ГТД.

2. Режущую часть полирующего круга в поперечном сечении следует выполнять с закруглением.

3. При обработке поверхности корыта пера лопатки для каждой ступени лопаток должен быть свой конкретный полирующий круг. При этом для комплекта ступеней лопаток должен быть сформирован комплект инструментов. В ряде случаев один инструмент может быть применен для обработки лопаток 2 ... 3 ступеней близких размеров.

4. При обработке поверхности лопатки необходимо обеспечивать параметры поджима полирующего круга из условия средних параметров нагружения. Для определения параметров нагружения зоны полирования необходимо предварительно проводить соответствующие расчеты.

5. Для обеспечения постоянных параметров качества рабочих поверхностей лопатки необходимо вести управление параметрами за счет изменения усилия поджима полирующего круга.

Приведенные рекомендации нужно учитывать при обработке рабочих поверхностей пера лопатки ГТД.

## 6. Заключение

Таким образом, выполненные исследования дают возможность решать вопросы повышения качества криволинейных поверхностей ГТД из титановых сплавов на основе установления механизма полировки и определения схем взаимодействия инструмента и поверхности лопатки. В представленной работе решены следующие вопросы:

1. Проведенные исследования позволили определить физическую сущность и механизм процесса полирования криволинейных поверхностей лопатки. При этом установлено, что процесс полирования лопаток из титановых сплавов обусловлен действием комплекса различных типов технологических воздействий.

2. В работе установлены основные особенности обработки и схемы взаимодействия инструмента и криволинейных поверхностей лопатки. При этом показано, что процессу обработки криволинейных поверхностей пера лопатки свойственны резко изменяющиеся параметры контактирования полировального круга и рабочей поверхности лопатки в зоне их контакта.

3. Выполненные исследования позволили разработать математические модели взаимодействия инструмента и поверхности лопатки.

4. В данной работе представлены основные рекомендации по повышению качества обработки криволинейных поверхностей лопатки.

**Список литературы:**

1. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. – 335 с.
2. Богуслаев В.А., Цыпак В.И., Яценко В.К. Основы технологии машиностроения. Учебн. пособие для студентов машиностр. спец. вузов. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 336 с.
3. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
4. Демин Ф.И., Пронищев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
5. Ящерицын П.И., Зайцев А.Г., Барботько А.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. – Минск: Наука и техника, 1976. - 328 с.
6. Гавриш А.П., Мельничук П.П. Фінішна алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів. – Житомир: ЖДТУ. 2004. - 551 с.
7. Качество машин: Справочник. В 2-х т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. - М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.; Т.2 / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. - М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.
8. Гусакова Л.В. Повышение эффективности шлифования поверхностей деталей из высоколегированных и жаропрочных материалов изменением конструкции и состава абразивного инструмента. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Ростов н/д, 2012. - 18 с.
9. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. – М.: Гостехиздат, 1949. – 270 с.
10. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. - 847 с.

Надійшла до редколегії 20.05.2014 р.

**Д.О. Михайлов**

**ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ПОЛІРУВАННЯ  
КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ ЛОПАТОК ГТД З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ**

*У статті наведено дані про деякі особливості полірування криволінійних поверхонь лопаток авіаційних двигунів. Представлено опис фізичної сутності процесу полірування лопаток і особливості обробки їх криволінійних поверхонь. А також розроблені математичні моделі взаємодії інструменту і поверхні лопатки. У даній роботі представлені результати і дані рекомендації полірування лопаток.*

**Ключеві слова:** лопатка, авіаційний двигун, полірування, процес, технологія.

**D.A. Mikhaylov**

**SOME FEATURES OF POLISH OF  
CURVILINEAR SURFACES OF GTE BLADES OF ENGINES FROM TITANIC ALLOYS**

*The article presents information about some features of polishing curved surfaces of the blades of aircraft engines. The description of the physical essence of the polishing process of the blades and their processing features curved surfaces. And the mathematical models of the interaction of the tool and the surface of the blade. This paper presents the results and recommendations polishing blades.*

**Key words:** GTE blade, aircraft engine, polishing, process technology