

УДК 621.9.044

А. М. СМЫСЛОВ, М. К. СМЫСЛОВА, А. Д. МИНГАЖЕВ, К. С. СЕЛИВАНОВ

## МНОГОЭТАПНАЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНА И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Предлагаемый способ многоэтапного электролитно-плазменного полирования лопаток турбомашин из титановых сплавов позволяет значительно (до Ra 0,05..0,06 мкм) повысить качество окончательной обработки. Установлено, что применение ПАВ значительно улучшает равномерность полирования, что особенно важно при изготовлении сложнопрофильных деталей. *Турбомшины; лопатки ГТД; финишная обработка; полирование; электролитно-плазменное полирование; шероховатость*

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основными деталями газотурбинных двигателей и паровых турбин, определяющими их эксплуатационные характеристики, являются рабочие лопатки компрессора и турбины. Лопатки турбомашин в процессе эксплуатации подвергаются воздействиям значительных динамических и статических нагрузок, коррозионному и эрозионному разрушению. Исходя из предъявляемых к эксплуатационным свойствам требований, для изготовления лопаток компрессора газовых и паровых турбин применяют титановые сплавы, которые по сравнению с техническим титаном имеют более высокую прочность, в том числе и при высоких температурах, сохраняя при этом достаточно высокую пластичность и коррозионную стойкость (например, титановые сплавы марок ВТ6, ВТ14, ВТ3-1, ВТ22 и др.)

Лопатки из указанных сплавов обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжения, что определяет высокие требования к качеству изготовления этих деталей. Например, недопустимы любые поверхностные дефекты, возникающие при механической обработке, поскольку они обуславливают интенсивные процессы разрушения. В этой связи развитие способов, обеспечивающих высокое качество рабочих поверхностей деталей турбомашин является актуальной задачей.

Для достижения высокого качества обработки лопаток турбомашин используют различные методы полирования, наиболее перспективными из которых являются способы электрохимической обработки [1, 2]. В то же время, с точки зрения экологичности и эффективности обработки лопаток из легированных ста-

лей и особенно титановых сплавов особо выделяют методы электролитно-плазменного полирования (ЭПП) деталей машин [3, 4]. Однако обработка деталей из титана и титановых сплавов методом ЭПП связана с решением комплекса технических задач.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для обработки титана и титановых сплавов используют двухстадийное электролитно-плазменное полирование. Сущность этого метода заключается в том, что обрабатываемое металлическое изделие погружают в водный раствор электролита и прикладывают к нему положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение, при этом между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом образуется парогазовый слой [5]. Процесс электрохимического полирования проводят в два этапа. На первом к обрабатываемому изделию прикладывают электрическое напряжение от 90 до 190 В и при этом напряжении изделие выдерживают в течение от 0,1 до 5 секунд. На втором этапе напряжение увеличивают до 200...400 В и поддерживают постоянным до окончания процесса полирования, обеспечивая непрерывную подачу электрического напряжения на каждом из этапов электрохимического полирования, включая момент перехода от первого этапа ко второму.

Указанный способ, предусматривает проведение обработки деталей на начальном этапе при более низких напряжениях. Это позволяет производить обработку металлических изделий из более широкого круга материалов, в том числе из титана и его сплавов, циркония и его сплавов, при одновременном уменьшении пиковой мощности используемого источника питания. Использование эффекта «стадийности» элек-

тролитно-плазменного полирования деталей в общем случае позволяет расширять технологические возможности обработки, но в рассматриваемом случае использование двухстадийной обработки не приводит к ощутимому повышению качества полирования.

Основываясь на идее использования поэтапной электролитно-плазменной обработки, авторами был разработан и исследован новый способ обработки титановых сплавов [6]. Разработка была направлена на повышение качества полирования изделий из титана и титановых сплавов за счет использования многоэтапной обработки с изменением режимов воздействия на обрабатываемую поверхность.

## 2. МНОГОЭТАПНАЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА

Сущность способа многоэтапного электролитно-плазменного полирования изделий из титана и титановых сплавов [6] заключается в том, что обрабатываемое металлическое изделие погружают в водный раствор электролита и прикладывают к нему положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение, под действием которого между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом образуется парогазовый слой. В процессе обработки изменяют на каждом этапе величину электрического напряжения и время выдержки изделия, обеспечивая в течение первого и второго этапов непрерывную подачу электрического напряже-

ния, включая момент перехода от первого этапа ко второму. Собственно процесс электрохимического полирования осуществляют по крайней мере в два этапа, на первом из которых к обрабатываемому изделию прикладывают электрическое напряжение  $150 \pm 30$  В и при этом напряжении выдерживают изделие в течение  $0,5 \pm 3$  мин. На втором этапе это напряжение увеличивают до  $250 \pm 30$  В и выдерживают изделие при этом напряжении от 1,5 до 5 минут. Далее проводят третий этап полирования изделия. Не изменяя процесс обработки отключают электрическое напряжение, после чего изделие удаляют из электролита, охлаждают и вновь прикладывают к нему положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение от 210 до 350 В. Далее изделие погружают в электролит и ведут полирование течение от 0,8 до 2,5 минут.

Предлагаемый способ многоэтапного электролитно-плазменного полирования предусматривает четвертый этап полирования изделия. Для этого, не вынимая изделие из электролита, отключают электрическое напряжение, удаляют изделие из электролита, охлаждают изделие, вновь прикладывают к нему положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение 210...350 В, погружают изделие в электролит и ведут полирование течение от 0,8 до 2,5 минут.

Т а б л и ц а 1

Изменение шероховатости обрабатываемой поверхности при многоэтапном электро-плазменном полировании

Вариант способа	№	Материал	Исходная шероховатость поверхности, $R_a$ мкм	Этапы обработки и значение шероховатости поверхности ( $R_a$ мкм), после каждого этапа обработки				Примечание
				Первый	Второй	Третий	Четвертый	
Прототип	1.	BT-1	0,45...0,50	–	0,30..0,35	–	–	Неоднородная обработка
	2.	BT3-1	0,45...0,50	–	0,30..0,35	–	–	
	3.	BT6	0,45...0,50	–	0,30..0,35	–	–	
Предлагаемый	4.	BT-1	0,45...0,50	–	0,20..0,25	0,06..0,08	0,04..0,05	Однородная обработка
	5.	BT3-1	0,45...0,50	–	0,25..0,30	0,09..0,11	0,05..0,07	
	6.	BT6	0,45...0,50	–	0,25..0,30	0,08..0,12	0,05..0,06	
Предлагаемый с добавлением ПАВ	7.	BT-1	0,45...0,50	–	0,20..0,25	0,06..0,08	0,04..0,05	
	8.	BT3-1	0,45...0,50	–	0,25..0,30	0,09..0,11	0,05..0,07	
	9.	BT6	0,45...0,50	–	0,25..0,30	0,08..0,12	0,05..0,06	

При разработке способа были исследованы следующие составы электролитов: водные растворы электролитов, в состав которых входят соли борфтористоводородной, кремнефтористой, гексафтортитановой или плавиковой кислот; водные растворы 2...3%  $\text{NH}_4\text{F}$ . В состав электролита дополнительно вводили поверхностно-активные вещества в концентрации от 0,4 до 0,8% или от 0,3 до 0,8%  $\text{TiF}_4$ . Обработку деталей из титана и титановых сплавов проводили при величине тока не менее 0,5 А/дм<sup>2</sup>.

Процесс многоэтапного электролитно-плазменного полирования лопаток турбомашин из титана и титановых сплавов осуществлялся следующим образом. Обрабатываемое изделие погружали в ванну с водным раствором электролита, прикладывали к изделию положительное напряжение, а к электролиту – отрицательное. В результате этого происходило возникновение разряда между обрабатываемым изделием и электролитом. Процесс электрохимического полирования осуществлялся в два этапа. На первом этапе к обрабатываемому изделию прикладывали электрическое напряжение 120...170 В и выдерживали изделие при этом напряжении в течение 0,5 мин. На втором этапе напряжение увеличивали до 210...350 В и выдерживали изделие при этом напряжении в течение трех минут. Обработку проводили в среде электролита при поддержании вокруг детали парогазовой оболочки. Для повышения качества обработки изделия осуществляли третий этап полирования. Для этого, не вынимая изделие из электролита, отключали электрическое напряжение, удаляли изделие из электролита, охлаждали изделие, вновь прикладывают к нему положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение 210...350 В, погружали изделие в электролит и вели полирование в течение 0,8...2,5 минут. В качестве электролита использовали водный раствор солей борфтористоводородной, кремнефтористой, гексафтортитановой или плавиковой кислот. Величина рН электролита находилась в пределах от 4 до 9. При обработке производили циркуляционное охлаждение электролита, поддерживалась средняя температура процесса в интервале от 80 до 85°C. Результаты обработки поверхности изделий из титановых сплавов приведены в таблице. Результаты приведены в сравнении со способом-прототипом [5].

В процессе обработки под действием протекающих токов происходит нагрев поверхности лопатки и образование вокруг нее парогазовой оболочки. Излишняя теплота, возникающая при нагреве детали и электролита отводится через

систему охлаждения, которая обеспечивает заданную температуру процесса. Под действием электрического напряжения (потенциала между деталью и электролитом) в парогазовой оболочке возникает разряд, представляющий из себя ионизированную электролитическую плазму [7, 8], обеспечивающую протекание интенсивных химических и электрохимических реакций между обрабатываемой деталью и средой парогазовой оболочки.

При подаче положительного потенциала на деталь, в процессе протекания указанных реакций, происходит анодирование поверхности детали с одновременным химическим травлением образующегося окисла. Причем при анодной поляризации парогазовый слой состоит из паров электролита, анионов и газообразного кислорода. Поскольку травление происходит в основном на микронеровностях, где образуется тонкий слой окисла, а процессы анодирования продолжают, то в результате совместного действия этих факторов происходит уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности и, как следствие, ее полирование [7, 8].

Исследование обработанных деталей показало, что многоэтапное полирование лопаток из титана или титановых сплавов позволяет значительно повысить качество обработки. В зависимости от конкретных целей и условий обработки, а также материала изделия количество этапов обработки может колебаться от двух до пяти и более.

Исследования также показали, что на первой фазе обработки поверхность изделия покрывается слоем фтористых соединений. Так, при использовании электролита в виде водного раствора  $\text{NH}_4\text{F}$ , образуется слой  $\text{TiF}_4$  при одновременном вытеснении кислорода:  $\text{TiO}_2 + \text{F}^- \rightarrow \text{TiF}_4$ . На первой фазе обработки полирования практически не происходит. Длительность первой фазы изменяется от 0,3 до 0,8 мин, электрическое напряжение от 120 до 170 В. Например при обработке титанового сплава ВТ-6 напряжение устанавливается около 160 В, время обработки примерно равно 0,5 мин. Если на этом этапе остановить процесс полирования, то деталь будет покрыта коричневым слоем  $\text{TiF}_4$  легко смываемого холодной (20°C) водой.

На второй фазе обработки напряжение увеличивают до 210...350 В и выдерживают изделие при этом напряжении в течение от 1,5 до 5 минут.

Необходимо отметить, что при переходе от первой ко второй фазе недопустимы провалы напряжения, так как это приводит к дестабилизации парогазовой оболочки и непосредствен-

ному контакту электролита с поверхностью изделия, что ухудшает качество обработки.

За счет увеличения напряжения повышается температура разряда и происходит основной процесс полирования. Для титанового сплава ВТ-6 напряжение устанавливается около 200 В, время обработки примерно равно 2...3 мин. Поскольку изделие из-за наличия паро-газовой оболочки непосредственно не контактирует с электролитом, то соединение  $TiF_4$  испаряется, то есть полирование на второй фазе ведется при одновременном испарении фторированного слоя (температура плавления  $TiF_4$  равна  $238^\circ C$ ).

Вторая фаза обработки позволяет получить более качественную полированную поверхность изделия. Однако качество обработки может быть повышено проведением второй и последующих фаз полирования.

Третий и последующие этапы полирования изделия осуществляют следующим образом. Не вынимая изделие из электролита, отключают электрическое напряжение, удаляют изделие из электролита, охлаждают изделие, вновь прикладывают к нему положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение порядка 210...350 В и погружают в электролит. Полирование ведут течение от 0,8 до 2,5 минут. Для титанового сплава ВТ-6 напряжение может быть около 200 В, время обработки – 2 мин.

### ВЫВОДЫ

При обработке сложнопрофильных изделий из титана и титановых сплавов, таких как лопатки турбомашин, целесообразно введение в состав электролита поверхностно-активных веществ (ПАВ). Введение ПАВ уменьшает коэффициент поверхностного натяжения раствора, что улучшает состояние парогазового слоя на границе «газ-жидкость». Однако не следует создавать значительных концентраций ПАВ, поскольку это может привести к образованию нежелательных трудноудаляемых пленок на поверхности изделия. Кроме того, увеличение концентрации ПАВ может привести к обратному эффекту, то есть увеличению величины коэффициента поверхностного натяжения раствора. Концентрация основных компонентов электролита является величиной достаточно варьируемой. При этом нижний предел их концентрации определяется необходимостью обеспечения количественного доминирования ионов фтора над ионами кислорода как в образующей-

ся на поверхности изделия пленке, так и в парогазовой оболочке. Верхний предел концентрации раствора электролита ограничивают увеличением количества образующихся, в процессе обработки, токсичных газообразных продуктов ( $F_2$ ,  $NH_3$ ). Для минимизации джоуль-ленцовых потерь электролит должен обладать достаточной электропроводимостью. Кроме этого, при подборе электролита для промышленного использования необходимо учитывать возможность его продолжительного использования без дополнительной корректировки состава.

Проведенные исследования показали, что разработанный способ многоэтапного электролитно-плазменного полирования [6] позволяет повысить качество обработки изделий из титановых сплавов ВТ-1, ВТ3-1 и ВТ-6. Как видно из приведенных ранее в таблице примеров, средние значения шероховатости поверхности улучшается от  $Ra\ 0,30...0,35\ \mu m$  (после традиционного метода обработки), до  $Ra\ 0,05...0,06\ \mu m$  (после предлагаемого способа полирования). Установлено, что применение ПАВ позволяет значительно улучшать равномерность полирования, что особенно важно при изготовлении сложнопрофильных деталей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грилихес С. Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойства металлов. Л.: Машиностроение, 1987.
2. Патент США № 6165345, МПК C25F 5/00, опубл. 26.12.2000 г.
3. Патент РФ № 1132, МПК C 25 F 3/16, БИ №3, 1996.
4. Патент ГДР № 238074, МПК C 25 F 3/16, 1986.
5. Патент РФ № 2168565, МПК C25F3/16. Способ электрохимического полирования металлических изделий, 2001.
6. Заявка РФ № 2007123850, МПК C25F3/16, Способ многоэтапного электролитно-плазменного полирования изделий из титана и титановых сплавов / Смыслов А.М. [и др.], 2007.
7. Процесс электролитно-плазменной обработки деталей ГТД с предварительным формированием парогазовой оболочки / М. К. Смыслова [и др.] // Проблемы машиноведения, процессов управления и критических технологий: сб. науч. тр. Уфа: Гилем, 2008.
8. Баковец В. В., Поляков О.В., Долговесова И. П. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. М: Наука, 1991. 165 с.

## ОБ АВТОРАХ



**Смыслов Анатолий Михайлович**, зав. каф. техн. маш. Дипл. инж.-технолог (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей ЛА (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. ионно-имплантационного и вакуумно-плазменного модифицирования поверхности.



**Мингажев Аскар Джамильевич**, доц. каф. техн. маш. Дипл. инж. по машинам и аппаратам хим. пр-в (УНИ, 1976). Канд. техн. наук по техн. летательн. аппаратов и двигателей (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. жаростойких и термобарьерных покрытий применит. к деталям авиац. техн.



**Смыслова Марина Константиновна** доц. каф. оборуд. и техн. сварочн. пр-ва. Дипл. инж. техн. машиностр. (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по техн. машиностр. (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. высокотвердых вакуумных ионно-плазмен. покрытий.



**Селиванов Константин Сергеевич**, доц. каф. техн. маш. Дипл. инж. по техн. машиностр. (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по техн. машиностр. (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. физ.-хим., структурно-фазового состава и экспл. свойств поверхности деталей.