

УДК 669.295

Д.А. Добрынин¹**ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT6 и VT8M-1**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-2-2

Проведен сравнительный анализ традиционных методов полирования поверхности (механический, химический и электрохимический методы) с методом электролитно-плазменной обработки. Осуществлено электролитно-плазменное полирование поверхности образцов из титановых сплавов VT6 и VT8M-1 в двухкомпонентном электролите на основе солей плавиковой кислоты общей концентрацией не более 5% (по массе). Определены скорости полирования титановых сплавов VT6 и VT8M-1 в предложенном электролите. Исследовано влияние длительности электролитно-плазменного полирования поверхности образцов из титановых сплавов VT6 и VT8M-1 на параметр шероховатости поверхности R_a . Установлены качественные зависимости скоростей полирования поверхности титановых сплавов VT6 и VT8M-1 от концентрации электролита, его температуры и рабочего напряжения.

Ключевые слова: электролитно-плазменное полирование, титановый сплав, парогазовая оболочка, микроаряд.

In the article, a comparative analysis of traditional methods of surface polishing (mechanical, chemical and electrochemical methods) with the electrolytic-plasma treatment method was carried out. Electrolytic-plasma polishing of the surface of samples from titanium alloys VT6 and VT8M-1 in a two-component electrolyte on the basis of hydrofluoric acid salts with a total concentration of no more than 5% by weight was carried out. The polishing rates of titanium alloys VT6 and VT8M-1 in the proposed electrolyte are determined. The influence of the duration of electrolytic-plasma polishing of the surface of samples from titanium alloys VT6 and VT8M-1 on the surface roughness parameter R_a was studied. The qualitative dependences of the polishing rates of the surface of titanium alloys VT6 and VT8M-1 on the concentration of electrolyte, its temperature and operating voltage are established.

Keywords: electrolytic-plasma polishing, titanium alloy, vapor-gas shell, microdischarge.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Для повышения газодинамического коэффициента полезного действия (КПД) компрессора и турбины газотурбинного двигателя (ГТД) путем уменьшения уровня шероховатости поверхности лопаток, деталей компрессора и турбины и подготовки поверхности лопаток ГТД для нанесения защитных покрытий [1–8] при их изготовлении и ремонте [9] широко применяются методы механического, химического и электрохимического полирования поверхности. При полировании происходит улучшение внешнего вида изделий, изделия приобретают красивый декоративный блеск, уменьшается шероховатость поверхности, повышается коррозионная стойкость полированной поверхности.

Механическое полирование поверхности крупных деталей производят преимущественно абразивными кругами и лентами [10]. Полировальные круги изготавливают

из сукна, брезента, войлока и других материалов, на поверхность которых наносят полировальную пасту, в состав которой входит микропорошок, связка и поверхностно-активные вещества – активаторы обрабатываемой поверхности металла. В качестве микропорошка используют оксиды хрома, железа, алюминия, в качестве связки – парафин, стеарин, олеиновую кислоту и другие вещества. Для полирования поверхности деталей со сложным профилем используют абразивные ленты. Полирование поверхности абразивными лентами имеет существенные преимущества по сравнению с полированием абразивными кругами: значительно больше поверхность соприкосновения ленты с обрабатываемым изделием, постоянная скорость полирования и шлифования, не требуется балансировка рабочего инструмента, более безопасные условия труда. Полирование поверхности абразивными кругами и лентами, с применением полировальных паст, позволяет достигать величины шероховатости поверхности R_a в диапазоне от 0,12 до 0,05 мкм.

Для полирования поверхности мелких деталей используют вибрационно-абразивную обработку и галтовку в барабанах с абразивными материалами, в которые загружают насыпью детали. При вращении барабана, в результате трения изделий или абразива и изделий между собой, с выступающих частей поверхности снимается тонкий слой металла. В качестве абразива используют стальные шарики, древесные опилки, кусочки кожи и другие мягкие материалы. С целью повышения интенсивности полирования можно проводить обработку в жидкой среде. Жидкая среда способствует удалению продуктов полирования с поверхности обрабатываемого изделия, слоя оксидов и обезжириванию поверхности. В качестве жидкой среды используют мыльные, кислотные, щелочные растворы. Полирование поверхности в барабанных установках способствует снижению величины шероховатости поверхности R_a с 1,6–0,8 до 0,2 мкм [11].

Несмотря на большое количество существующих разновидностей механического полирования поверхности изделий, механическое полирование достаточно трудоемко, экологически вредно, требует больших затрат расходуемых материалов и временных затрат, при механическом полировании возможно внедрение частичек абразива в основу.

При химическом полировании происходит одновременное уменьшение неровностей поверхности в результате растворения поверхностного слоя, образование оксидной пленки при взаимодействии компонентов раствора с обрабатываемым материалом и появление блеска. Повышение блеска поверхности свидетельствует о прекращении травления поверхности обрабатываемого изделия вследствие образования на его поверхности оксидной пленки. Результат химического полирования зависит от соотношения скорости формирования оксидной пленки и ее растворения, при преобладании скорости формирования оксидной пленки происходит оксидирование поверхности, при преобладании скорости растворения оксидной пленки – травление поверхности [12]. Максимальный блеск полированной поверхности наблюдается при минимальной толщине оксидной пленки, достаточной для предотвращения травления обрабатываемой поверхности, что соответствует равенству скоростей химического процесса формирования оксидной пленки и процесса ее растворения [11].

Равномерность обработки поверхности при химическом полировании зависит от плотности загрузки изделий в технологической ванне. При избыточной загрузке наблюдается неравномерность обработки, происходит экранирование поверхности изделий другими изделиями, в результате чего на обработанных изделиях присутствуют участки неполированной поверхности. После химического полирования необходима тщательная промывка в воде изделий от остатков технологического раствора. Дополнительно можно проводить химическое пассивирование полированной поверхности.

Основными достоинствами процесса химического полирования поверхности являются: применимость процесса для обработки изделий, имеющих сложную геометрическую форму (технологические отверстия, пазы, впадины, углубления и т. п.); относительно низкая трудоемкость и энергоемкость процесса, для осуществления которого не требуется высокотехнологичное оборудование. Однако процессу химического полирования поверхности присущ ряд существенных недостатков: быстрое «старение» технологических растворов и сложность их корректировки; высокая стоимость компонентов, входящих в состав растворов; применяемые растворы токсичны, в результате чего требуются специальные меры защиты персонала и окружающей среды; в процессе полирования возможно локальное растравливание поверхности полируемого изделия.

Для уменьшения трудоемкости и увеличения производительности применяют электрохимическое полирование. При электрохимическом полировании происходит повышение коррозионной стойкости и механических свойств полированной поверхности. Обрабатываемое изделие погружают в электролит, основными компонентами которого, как правило, являются кислоты: фосфорная, серная, хромовая. Полирование ведут при анодной поляризации обрабатываемого изделия и постоянном напряжении обработки 10–20 В [11]. Уменьшение шероховатости поверхности определяется в основном количеством электричества, пропущенного через электролит. В результате электрохимического полирования происходит уменьшение высоты микровыступов поверхности, округление их вершин, формирование волнообразного микрорельефа поверхности. Это обусловлено неравномерностью распределения электрического тока по микрорельефу поверхности и концентрационными изменениями электролита в прианодном слое [12].

При чистовой обработке изделий, на полируемой поверхности не должно быть глубоких царапин, забоин, раковин, так как они не устраняются при анодной обработке. Установлено, что плоские поверхности полируются хуже, чем цилиндрические, а максимальный блеск поверхности достигается на сравнительно небольших изделиях [12].

Процессу электрохимического полирования поверхности присущ ряд достоинств: повышение коррозионной стойкости и механических свойств обработанной поверхности (износостойкости, упругости, релаксационной стойкости) в результате сглаживания микровыступов поверхности и формирования волнообразного рельефа поверхности; относительно низкая трудоемкость процесса; процесс электрохимического полирования может быть автоматизирован. Несмотря на эти преимущества, метод электрохимического полирования поверхности имеет существенные недостатки: ограниченность номенклатуры обрабатываемых металлов; высокая стоимость компонентов, входящих в состав растворов, их токсичность и коррозионная активность по отношению к оборудованию, в результате чего требуются специальные меры для защиты персонала, окружающей среды и оборудования; в процессе работы происходит выделение пожаро- и взрывоопасных веществ, что требует проведения непрерывного контроля пожарной безопасности и использования оборудования в пожаро- и взрывобезопасном исполнении.

В последнее время активно ведутся исследования процесса электролитно-плазменного полирования поверхности металлических и полупроводниковых изделий. Электролитно-плазменное полирование отличается от электрохимического полирования тем, что полирование поверхности ведут при высоком напряжении в водных растворах солей. Обрабатываемое изделие погружают в электролит и прикладывают к нему рабочее напряжение. Под действием рабочего напряжения на поверхности изделия образуется тонкая парогазовая оболочка, которая отделяет поверхность изделия от электролита. Напряженность электрического поля в этой оболочке может достигать значений 10^4 – 10^6 В/м, в результате чего на микровыступах поверхности формируются

импульсные микроразряды, которые оказывают термическое, плазмохимическое и гидродинамическое воздействие на полируемую поверхность, приводящее к возникновению эффекта полирования и очистки поверхности изделий [13, 14].

Развитие явления разряда в приэлектродной области можно проследить по диаграмме «ток–напряжение» для системы «металл–электролит», приведенной на рис. 1 [13].

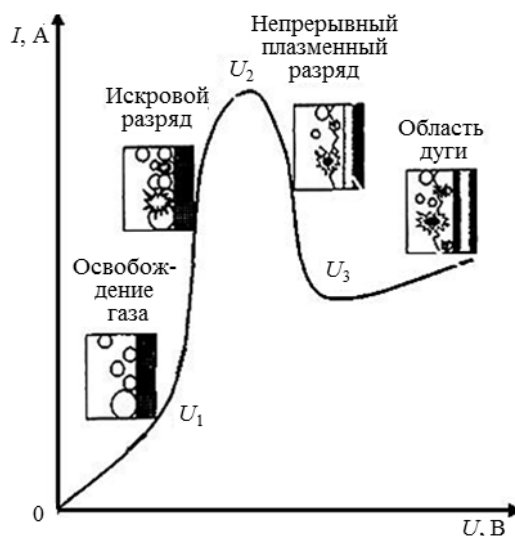


Рис. 1. Характеристика профиля «ток–напряжение» для процесса электролитно-плазменного полирования поверхности

В области напряжений $0-U_1$, т. е. в области протекания электрохимических процессов, характеристика «ток–напряжение» электролитической ячейки варьируется согласно закону Ома – увеличение напряжения приводит к пропорциональному увеличению тока. При увеличении напряжения – область U_1-U_2 , происходит колебание тока, сопровождающееся люминесценцией и формированием единичных микроразрядов на полируемой поверхности. Колебание тока обусловлено выделением газообразных продуктов реакции по всей поверхности обрабатываемого изделия. В точке U_2 изделие окутывается сплошной парогазовой оболочкой с низкой электропроводностью, в результате чего напряженность электрического поля в оболочке достигает значений 10^4-10^6 В/м. В области напряжений U_2-U_3 происходит гидродинамическая стабилизация парогазовой оболочки, рост ее толщины, и, как следствие, происходит снижение тока. В точке U_3 свечение микроразрядов трансформируется в интенсивное дугообразование, сопровождающееся низкочастотной эмиссией, которое может привести к повреждению полируемой поверхности [13].

Преимуществами этого вида обработки, по сравнению с традиционными методами механической, химической и электрохимической обработки поверхности, являются: невысокая стоимость компонентов растворов, их нетоксичность, минимальное воздействие на окружающую среду, высокая производительность и эффективность (в 3–4 раза больше по сравнению с механической обработкой и в 5–6 раз больше по сравнению с электрохимической обработкой [11]), относительно равномерная обработка сложнопрофильных изделий, возможность полной автоматизации процесса. Несмотря на эти преимущества, метод электролитно-плазменного полирования поверхности имеет ряд недостатков: метод неприменим для обработки изделий, имеющих глубокие отверстия (глубина отверстия превышает диаметр), пазы, впадины и углубления – внутри углублений образуются застойные зоны, препятствующие проведению процесса электролитно-плазменного полирования; для реализации процесса требуются большие энергетические затраты и специальные источники тока.

В работе приводятся результаты электролитно-плазменного полирования образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1, в том числе результаты исследования влияния длительности электролитно-плазменного полирования поверхности образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 на параметр шероховатости поверхности R_a .

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие коррозионные и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Материалы и методы

Работу проводили на лабораторной установке электролитно-плазменной обработки поверхности (рис. 2), которая состоит из технологической ванны – I; системы фильтрации и охлаждения электролита – II; источника питания – III; подъемно-погружного устройства с держателем образцов, оснащенного электроприводом для обеспечения автоматического погружения образцов в электролит – IV.

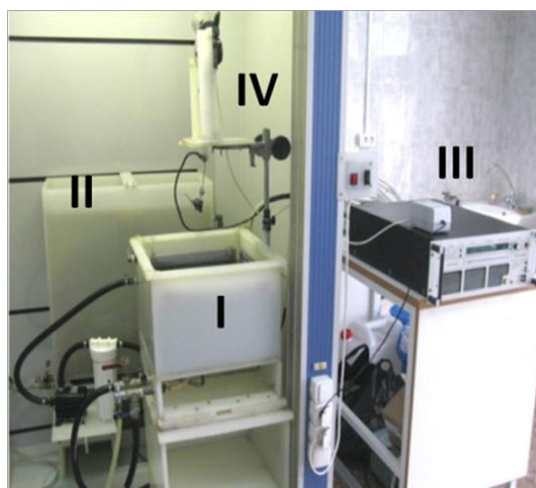


Рис. 2. Лабораторная установка электролитно-плазменной обработки поверхности:

I – технологическая ванна; II – система охлаждения и фильтрации электролита; III – источник питания; IV – подъемно-погружное устройство с держателем образцов

В качестве образцов использовали квадратные пластины из титанового сплава ВТ6 размером 2×35×35 мм и цилиндрические образцы из титанового сплава ВТ8М-1 размером $\varnothing 25 \times 40$ мм. Составы сплавов, из которых изготовлены образцы, представлены в табл. 1, а их плотности приведены в табл. 2.

Таблица 1

Составы сплавов, из которых изготовлены образцы

Сплав	Среднее содержание легирующего элемента, % (по массе)								
	Ti	Fe	C	Si	N	Al	V	Zr	Sn
ВТ6	Основа	<0,6	<0,1	<0,1	<0,05	5,3–6,8	3,5–5,3	<0,3	–
ВТ8М-1	Основа	<0,3	<0,1	0,10–0,22	<0,03	5,0–5,8	–	0,3–1,5	0,3–1,5

Продолжение

Сплав	Среднее содержание легирующего элемента, % (по массе)							
	Ni	Mo	Cr	Cu	Mn	O	H	Примеси
ВТ6	–	–	–	–	–	<0,2	<0,012	<0,3
ВТ8М-1	<0,08	3,0–4,3	<0,15	<0,1	<0,15	<0,15	<0,015	<0,3

Таблица 2

Плотности сплавов, из которых изготовлены образцы

Сплав	Плотность сплава, г/см ³
BT6	4,45
BT8M-1	4,48

Скорость полирования поверхности определяли гравиметрическим методом. Каждую минуту производили визуальный контроль поверхности обрабатываемых образцов и их взвешивание.

Параметр шероховатости поверхности R_a измеряли профилометром марки Hommel Tester T500, который осуществляет в автоматическом режиме обсчет получаемой профилограммы в пределах базового участка и определяет числовое значение параметра шероховатости R_a .

Результаты и обсуждение

Полирование поверхности образцов из титановых сплавов BT6 и BT8M-1 осуществляли электролитно-плазменным методом в предварительно нагретом двухкомпонентном электролите на основе солей плавиковой кислоты общей концентрацией не более 5% (по массе) при рабочем напряжении до 400 В. Выбор компонентов электролита осуществляли исходя из имеющихся сведений об электролитах электрохимического полирования титановых сплавов [12].

В процессе обработки происходило сглаживание рельефа поверхности образцов, притупление острых кромок, поверхность образцов приобрела блестящий вид.

Фотографии образцов из титановых сплавов BT6 и BT8M-1 до и после электролитно-плазменной полировки приведены на рис. 3.

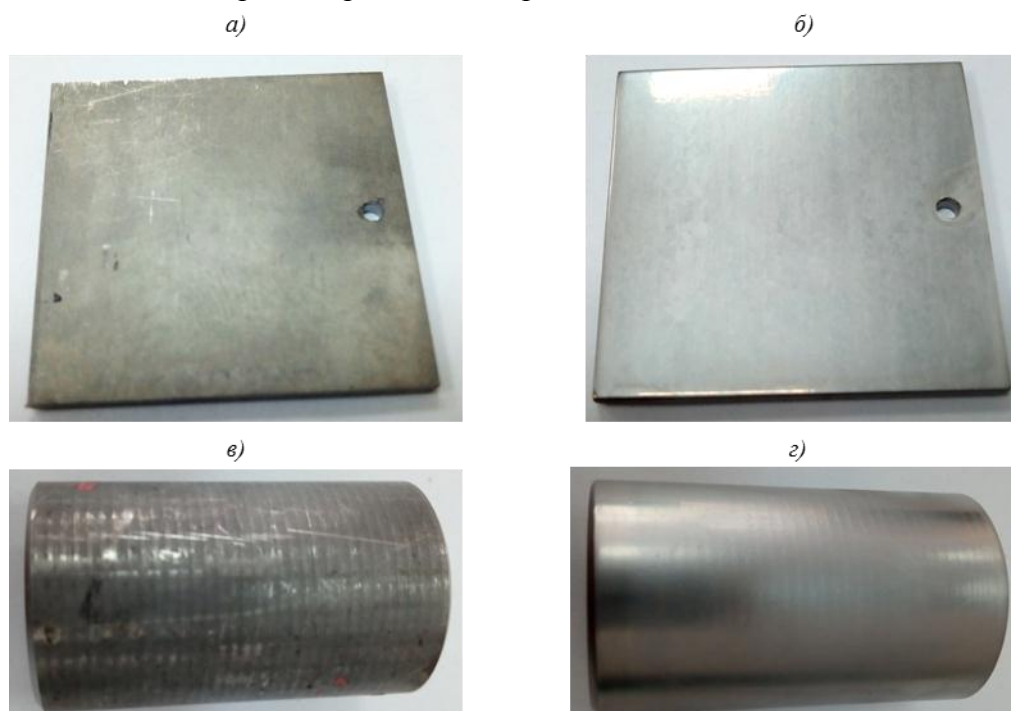


Рис. 3. Образцы из титановых сплавов BT6 (а, б) и BT8M-1 (в, г) до (а, в) и после (б, г) электролитно-плазменной полировки

Скорости электролитно-плазменного полирования поверхности образцов из титановых сплавов BT6 и BT8M-1 в предложенном электролите представлены в табл. 3.

Таблица 3

Скорости полирования поверхности образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1

Сплав	Скорость полирования	
	мг/(см ² ·мин)	мкм/мин
ВТ6	2,4	5,4
ВТ8М-1	1,5	3,4

В данной работе проведено исследование влияния длительности электролитно-плазменного полирования поверхности образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 на параметр шероховатости поверхности R_a .

Результаты изменения параметра шероховатости R_a поверхности образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 от длительности полировки представлены в табл. 4.

Таблица 4

Изменение параметра шероховатости R_a образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 от длительности полировки

Сплав	Параметр шероховатости R_a , мкм, в зависимости от длительности полировки, мин										
	до полировки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВТ6	0,83	0,76	0,68	0,62	0,53	0,48	0,43	0,39	0,41	0,39	0,40
ВТ8М-1	1,84	1,70	1,58	1,43	1,32	1,25	1,19	1,19	1,20	1,19	1,20

Согласно полученным результатам, в процессе электролитно-плазменного полирования значение параметра шероховатости поверхности R_a для образца из титанового сплава ВТ6 уменьшилось с 0,83 до 0,39 мкм в течение 7 мин – в среднем в 2 раза. Для образца из титанового сплава ВТ8М-1 значение параметра шероховатости поверхности R_a изменилось с 1,84 до 1,19 мкм в течение 6 мин – в среднем в 1,5 раза. Дальнейшее увеличение длительности полирования не приводит к уменьшению шероховатости поверхности образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1, а наоборот, возможно незначительное увеличение шероховатости поверхности, что обусловлено спецификой процесса – полирование поверхности при электролитно-плазменной обработке осуществляется за счет электрохимического растворения материала совместно с электроэрозивным оплавлением микровыступов, образующих рельеф поверхности. Таким образом, увеличение длительности электролитно-плазменного полирования >7 мин не улучшает качества полированной поверхности и не оправдывает значительные дополнительные энергетические затраты.

По результатам исследований установлены качественные зависимости скоростей полирования поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 от концентрации электролита, его температуры и рабочего напряжения. Графики зависимостей приведены на рис. 4.

На рис. 4, а показана зависимость скорости полирования поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 от концентрации электролита при фиксированных рабочем напряжении и температуре электролита. Экспериментально установлено, что электролитно-плазменная обработка возможна только в узком диапазоне концентраций электролита – от C_{\min} до C_{\max} , когда существует устойчивая парогазовая оболочка, а концентрация электролита, при которой наблюдается максимальная скорость полирования поверхности, находится в этом диапазоне. Следует отметить, что скорость полирования поверхности незначительно зависит от концентрации электролита в указанном диапазоне концентраций, что согласуется с данными работы [11] по изучению процессов электролитно-плазменного полирования нержавеющей стали X18H10T.

На рис. 4, б показана зависимость скорости полирования поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 от температуры электролита при фиксированных рабочем напряжении и концентрации электролита. При низких температурах электролита $T_{\text{эл-та}} < T_1$ вместо полирования поверхности образцов наблюдался их нагрев, дальнейшее повышение температуры способствовало формированию парогазовой оболочки и протеканию процесса электролитно-плазменного полирования, однако в области температур, близких к значению T_1 , процесс отличался нестабильностью, происходили периодические срывы парогазовой оболочки. Повышение рабочей температуры электролита вплоть до $T_{\text{раб}}$ приводило к росту скорости полирования и повышению стабильности процесса электролитно-плазменной обработки поверхности. При некотором значении $T_{\text{раб}}$ в области температур $T_1 < T_{\text{раб}} < T_2$ наблюдалась максимальная скорость полирования поверхности. Дальнейшее повышение температуры вплоть до значения T_2 приводило к значительному снижению скорости полирования, уменьшению стабильности процесса электролитно-плазменной обработки, периодическому срыву парогазовой оболочки, повышенному испарению электролита из технологической ванны. При температуре T_2 , близкой к температуре кипения электролита, происходило интенсивное кипение электролита вблизи обрабатываемого образца и прекращение электролитно-плазменной обработки.

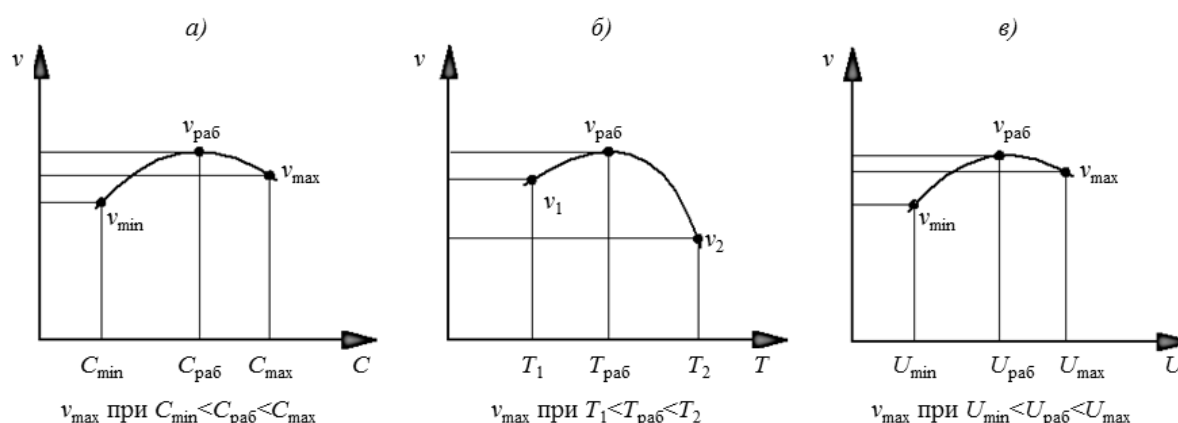


Рис. 4. Зависимости скорости полирования (v) поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 от концентрации (а) и температуры (б) электролита, а также рабочего напряжения (в)

На рис. 4, в показана зависимость скорости полирования поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 от рабочего напряжения при фиксированных концентрации и температуре электролита. Экспериментально установлено, что существует некоторое минимальное пороговое значение напряжения обработки U_{min} , при котором еще можно получить удовлетворительное качество полированной поверхности, но ниже которого качество полированной поверхности значительно ухудшается и уменьшается стабильность процесса электролитно-плазменной обработки, выражающаяся в периодических срывах парогазовой оболочки или полном прекращении процесса электролитно-плазменной обработки. Дальнейшее повышение напряжения вплоть до $U_{\text{раб}}$ приводило к росту скорости полирования и повышению стабильности процесса электролитно-плазменной обработки поверхности. При некотором значении $U_{\text{раб}}$ в области напряжений $U_{\text{min}} < U_{\text{раб}} < U_{\text{max}}$ наблюдалась максимальная скорость полирования поверхности. Дальнейшее повышение напряжения вплоть до U_{max} приводило к снижению скорости полирования, уменьшению стабильности процесса электролитно-плазменной обработки и периодическому срыву парогазовой оболочки, что объясняется ростом ее толщины, а при напряжениях обработки больше U_{max} процесс электролитно-плазменного полирования невозможен.

Заключения

Метод электролитно-плазменного полирования поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 является альтернативной заменой традиционным методам полирования поверхности (механическому, химическому и электрохимическому методам), которые обладают рядом существенных недостатков: высокая трудоемкость, большие затраты расходуемых материалов и времени на обработку, токсичность используемых веществ. В противоположность этому, при электролитно-плазменном полировании титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 используется недорогой и экологически безопасный электролит на основе солей плавиковой кислоты малой концентрации (не более 5% (по массе)). Другим преимуществом метода электролитно-плазменного полирования является высокая скорость полирования поверхности. Установлено, что в течение 7 мин значение показателя шероховатости поверхности R_a для образца из титанового сплава ВТ6 уменьшилось в среднем в 2 раза (с 0,83 до 0,39 мкм), для образца из титанового сплава ВТ8М-1 – уменьшилось в среднем в 1,5 раза (с 1,84 до 1,19 мкм). Показано, что дальнейшее полирование образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 не улучшает качества полированной поверхности и не оправдывает значительные дополнительные энергетические затраты.

Таким образом, метод электролитно-плазменного полирования поверхности может использоваться для уменьшения уровня шероховатости поверхности лопаток ГТД, а также деталей компрессора и турбины, изготовленных из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1, и подготовки поверхности лопаток ГТД для нанесения защитных покрытий при их изготовлении и ремонте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // *Электromеталлургия*. 2016. №10. С. 23–38.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Конверсия в машиностроении*. 1999. №2. С. 42–47.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток ГТД // *Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия*. М.: Наука, 2006. С. 531–608.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Металлы*. 2007. №5. С. 23–34.
5. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 71–81.
6. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Чубаров Д.А. Технология получения ионно-плазменных жаростойких подслоев с повышенным содержанием алюминия для перспективных ТЗП // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 56–60. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-56-60.
7. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Комплексные термодиффузионные жаростойкие покрытия для безуглеродистых жаропрочных сплавов на никелевой основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №3. С. 25–30.
8. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 60–70.
9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Ягодкин Ю.Д. Перспективы применения ионно-плазменной технологии высоких энергий для межресурсного ремонта лопаток турбин // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. №1. С. 6–13.
10. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник в 2 т. / под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 240 с.

11. Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. Электролитно-плазменная обработка материалов // Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с.
12. Грилихес С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1983. 101 с.
13. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Бойко А.Г. и др. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // Успехи физ. мет. 2005. Т. 6. С. 273–344.
14. Воленко А.П., Бойченко О.В., Чиркунова Н.В. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий // Вектор науки ТГУ. 2012. №4 (22). С. 144–147.
15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.