

УДК 621.9.047

ИССЛЕДОВАНИЕ НАВОДОРАЖИВАНИЯ ПРИ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПЕРА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ9

© 2008 Г. В. Смирнов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрен процесс наводороживания обрабатываемой поверхности при импульсной окончательной электрохимической обработке (ЭХО) пера лопаток ГТД из титанового сплава ВТ9. Представлено уравнение регрессии, связывающее наводороживание и основные технологические факторы импульсной ЭХО. Обсуждаются области использования результатов исследования. Размерная импульсная электрохимическая обработка является оптимальным методом формообразования пера компрессорной лопатки, так как в сочетании с последующей упрочняющей способствует повышению предела длительной прочности материала.

Наводороживание, импульс, метод, формообразование, лопатка, компрессор, сплав

Повысить точность размеров второго рода (расположения пера относительно замка) можно за счет использования прогрессивных схем обработки. Речь идет о схемах, в которых реализуется принцип свободной периодической самоустановки пера относительно электродов и перезакрепления в процессе обработки, например [1], - наиболее простую из них. Тем самым устраняется влияние деформаций пера при удалении напряженного слоя в процессе ЭХО на точность расположения пера относительно замка после обработки. Однако реализовать даже наиболее простую из них на подобных заготовках, полученных методом ВСШ, можно только при условии высокой избирательности растворения при ЭХО, которая зависит от параметров ЭХО и особенно - состава электролита. Повышение локализации растворения положительно скажется также и на повышении точности формы. Однако следует учитывать, что при импульсной ЭХО оптимизация параметров по точности может не соответствовать оптимальным значениям с точки зрения наводороживания поверхности после обработки. Поэтому в нашем случае было принято решение приоритетным считать обеспечение заданной точности. Но определить влияние различных параметров ЭХО на наводороживание в виде эмпирической зависимости. И с ее помощью в практической работе определять предполагаемое содержание водорода в поверхностном слое после ЭХО на оптимальных по точности режимах и

сравнивать его с максимально допустимым. Если ожидаемая величина наводороживания будет превышать этот предел, то корректировать режимы в сторону снижения наводороживания.

Исследованию точности формообразования титановых сплавов и шероховатости обработанной поверхности при импульсной ЭХО посвящены многочисленные исследования. Наиболее обстоятельная из них - работа [2]. В результате комплексных исследований обрабатываемости титановых сплавов автор приходит к выводу, с которым сложно не согласиться, что для титановых сплавов типа ВТ9 высокой локализации растворения и снижения шероховатости поверхности до $R_a = 0,38 \dots 33$ мкм можно достичь в хлорид-нитратных и хлорид-бромидных смесях и их невысокой суммарной концентрации. Причем при добавлении в электролит поверхностно-активных веществ (ПАВ) класса неонов типа В1317 и ПАВ 24-30 шероховатость может быть снижена до $R_a = 0,30$ мкм. Поэтому в своих исследованиях влияния режимов импульсной ЭХО на наводороживание мы руководствовались приведенными рекомендациями.

Нами в работе [3] было показано, что содержание водорода в поверхностном слое зависит от структуры титанового сплава, состава электролита, его концентрации, кислотности, температуры, межэлектродного

зазора, напряжения на электродах, и получены уравнения регрессии для сплавов с различной структурой: ВТ20, ВТ9, ОТ4-2, связывающие перечисленные факторы с величиной наводороживания поверхности. В настоящих исследованиях был принят тот же методический подход. При этом задача наших исследований, с одной стороны, была сужена, так как внимание в них было сосредоточено на сплаве ВТ9. То есть из рассмотрения исключался фактор структуры. Мы полагали, что влияние фактора структуры сохранит свой характер в неизменном виде и при импульсном напряжении на электродах. С другой стороны, ЭХО на импульсном токе предполагает влияние дополнительных факторов – длительности импульса и скважности. В этом смысле наши исследования можно считать расширением представлений о наводороживании с учетом импульсного характера тока.

Экспериментальные исследования наводороживания поверхности при электрохимической обработке проводились на экспериментальной установке ЭХО-12 с использованием цилиндрических образцов из титанового сплава ВТ9, имеющих площадь 1 см^2 . В исходном состоянии образцы имели содержание водорода $0,005 \%$, шероховатость поверхности $R_a = 2,5 \text{ мкм}$. В исследованиях применялись электролиты хлористого натрия, натриевой селитры, аммиачной селитры. Результаты экспериментов представлены в виде зависимостей наводороживания поверхности от различных факторов.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости наводороживания поверхностного слоя при импульсной ЭХО сплава ВТ9 в различных электролитах. Наводороживание измерялось по стандартной методике. Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее. Сравнивая зависимости концентрации водорода в поверхностном слое от зазора, можно подтвердить ожидавшееся наличие максимума наводороживания при малых зазорах, которые являются основным рабочим диапазоном зазоров при импульсной ЭХО ($0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$). Однако при уменьшении зазоров до $0,04 \dots 0,06 \text{ мм}$ (в области сверхмалых зазоров, на которых ЭХО лопаток сопряжена с риском коротких за-

мыканий, и в то же время повышения избирательности процесса) отмечается тенденция на уменьшение наводороживания. То есть, в той области зазоров, при которых ЭХО реально может выступать в качестве окончательного метода, можно добиться минимального наводороживания. Уменьшение наводороживания в области малых зазоров можно объяснить перераспределением процентного соотношения выделяющихся на аноде газов в сторону уменьшения доли водорода, если в качестве основного источника наводороживания принять анодное газовыделение. Сравнение с аналогичными условиями растворения на постоянном токе дают сходную по характеру картину (зависимость 5 практически повторяет характер кривой 4 со сдвигом в область более высоких концентраций). Правда, в зависимости для постоянного тока существует минимум в области зазоров $0,4 \dots 0,5 \text{ мм}$. Однако данная область зазоров интересна не только в общетеоретическом плане. Дело в том, что при большой неравномерности припуска по перу лопатки перед ЭХО (что имеет место у малоприпусковых заготовок) определенная часть пера во время ЭХО оказывается в области средних зазоров, близких к указанным.

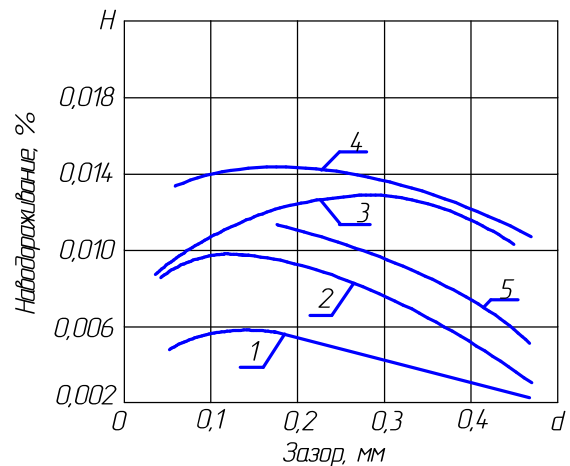


Рис. 1. Зависимость наводороживания сплава ВТ9 от межэлектродного зазора в различных электролитах: 1. - $3\% \text{ NaCl} + 2\% \text{ NaNO}_3$; 2 - $3\% \text{ NaCl} + 2\% \text{ NaNO}_3 + 0,1\% \text{ ПАВ}$; 3 - $9\% \text{ NaCl} + 6\% \text{ NaNO}_3 + 0,1\% \text{ ПАВ}$; 4. - $15\% \text{ NaCl} + 10\% \text{ NaNO}_3 + 0,1\% \text{ ПАВ}$; 5. - $15\% \text{ NaCl} + 10\% \text{ NaNO}_3 + 0,1\% \text{ ПАВ}$ (постоянный ток)

Увеличение концентрации электролита вызывает увеличение наводороживания (рис. 2), что противоположно тенденции на постоянном токе, а следовательно, накладыва-

вает ограничения на максимально возможную производительность процесса. Характер полученной зависимости можно объяснить увеличением потенциала пробоя окисной пленки и увеличением установившегося потенциала при прохождении импульса. А это создает неблагоприятные условия электрохимического восстановления нитрат-иона. Введение ПАВ24-30 в электролит незначительно повышает уровень наводораживания, по-видимому, за счет того же механизма, учитывая, что ПАВ изменяет распределение потенциалов.

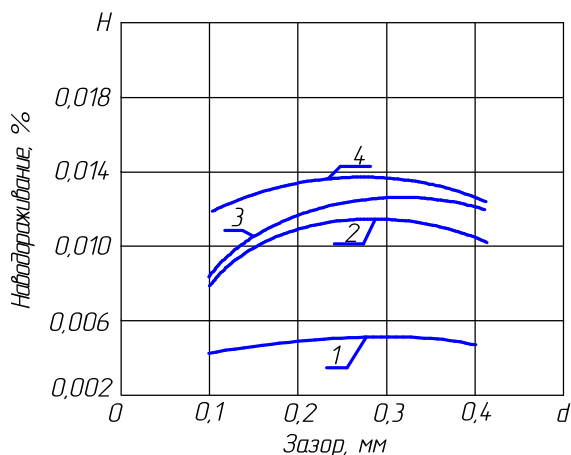


Рис.2. Зависимость наводораживания сплава ВТ9 от межэлектродного зазора в нитратных электролитах: 1- 6% NaNO₃; 2 - 6% NaNO₃+0,1%ПАВ, 3 – 10% NaNO₃; 4 - 10% NaNO₃+0,1%ПАВ

При увеличении рабочего напряжения на электродах возрастает интенсивность электродных процессов, связанных как с растворением металла, так и с электрохимическим восстановлением нитрат-иона (NO₃⁻).

По данным [5], увеличение плотности тока (напряжения) приводит к увеличению общей скорости газовыделения, в том числе азота - продукта восстановления NO₃⁻, и снижению скорости выделения водорода. То есть увеличение напряжения способствует замене реакций разряда водорода на реакцию восстановления окислителя, что и приводит к снижению наводораживания, как в случае ЭХО на постоянном токе. На рис. 4 приведены зависимости наводораживания от температуры электролита. Анализ этих результатов показывает, что общей и наиболее характерной чертой обработки на импульсном токе является то, что температура

электролита влияет на процесс наводораживания значительно меньше, чем при ЭХО на постоянном токе, т.е. нагрев даже до температуры 45°С не ведет к существенному увеличению наводораживания. То есть температура электролита при импульсной обработке титана не влияет на перераспределение скоростей выделения водорода и восстановления окислителя NO₃⁻. На рис. 5 приведена зависимость наводораживания от длительности импульса, из которой видно, что с увеличением длительности импульса наводораживание увеличивается. Это хорошо объясняется общим увеличением пропущенного через зазор электричества и в соответствии с этим увеличением объема выделившегося анодного водорода – основного источника наводораживания. Зависимость величины наводораживания от скважности приведена на рис. 6. Повышение наводораживания при увеличении паузы между импульсами, скорее всего, может быть обусловлено тем, что при возрастании пауз снижается скорость растворения анодной поверхности. При этом из вышеприведенных данных и распределений можно предположить, что в этих условиях реакция восстановления NO₃⁻ замещается на реакцию восстановления иона гидроксония, что приводит к увеличению наводораживания. Кроме того, при увеличении пауз возрастает время, в течение которого может продолжаться процесс взаимодействия водорода с поверхностью. Анализ результатов показывает, что наименьшее наводораживание при импульсной ЭХО может быть достигнуто при использовании в качестве электролита растворов нитратов (рис. 2, кривая 1), тогда как при постоянном токе наилучшие результаты были достигнуты при обработке в смесях на основе хлористого натрия и азотнокислого натрия или аммиачной селитры. Представляет интерес изучение влияния добавки поверхностно-активного вещества на величину наводораживания в условиях импульсной ЭХО. Для исследований было выбрано поверхностно-активное вещество класса неололов ПАВ 24-30, которое позволяет снизить шероховатость поверхности сплава ВТ9 более чем в два раза. Поскольку при анодном растворении сплава ВТ9 в хлориднитратных электролитах отмечается на

аноде выделение водорода, было важно определить влияние ПАВ на наводороживание поверхности. При этом если ПАВ будет способствовать более быстрому удалению пузырьков водорода с поверхности растворяющегося металла, то наводороживание будет уменьшаться, в противном случае - возрастать. Из зависимостей, показанных на рис. 3, 2, 1, 4, можно видеть, что введение ПАВ приводит к увеличению наводороживания поверхности. Важно отметить, что характер зависимостей наводороживания от зазора, напряжения и температуры электролита при введении ПАВ в электролит не нарушается, что свидетельствует о сохранении основных закономерностей наводороживания ВТ9 в этих условиях.

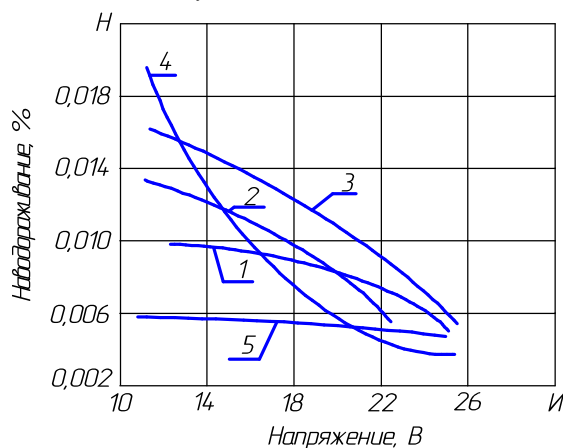


Рис. 3. Зависимость наводороживания сплава ВТ9 от напряжения на электродах:
 1 - 3%NaCl+2%NaNO₃; 2 - 15% NaCl + 10% NaNO₃;
 3 - 15% NaCl + 10% NaNO₃+0,1%ПАВ;
 4 - 15% NaCl + 10% NaNO₃ (постоянный ток);
 5 - 5% NH₄No₃

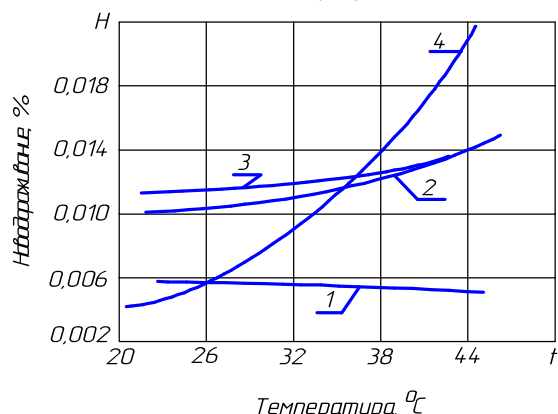


Рис.4. Зависимость наводороживания сплава ВТ9 от температуры электролита при обработке в различных электролитах: 1 - 3%NaCl+2%NaNO₃;
 2 - 3%NaCl+2%NaNO₃+0,1%ПАВ;
 3 - 12% NaCl+8% NaNO₃+0,1%ПАВ;
 4 - 12% NaCl+8% NaNO₃ (постоянный ток)

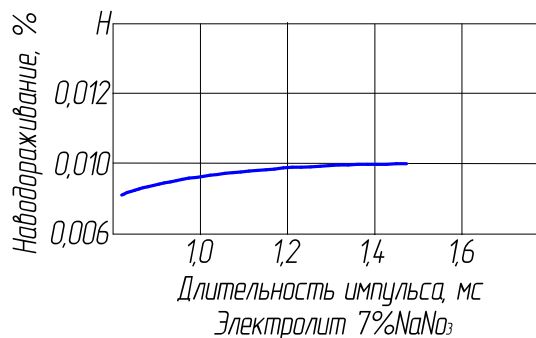


Рис. 5. Зависимость наводороживания поверхности образцов из сплава ВТ9 от длительности импульса. Электролит 8% NaNO₃

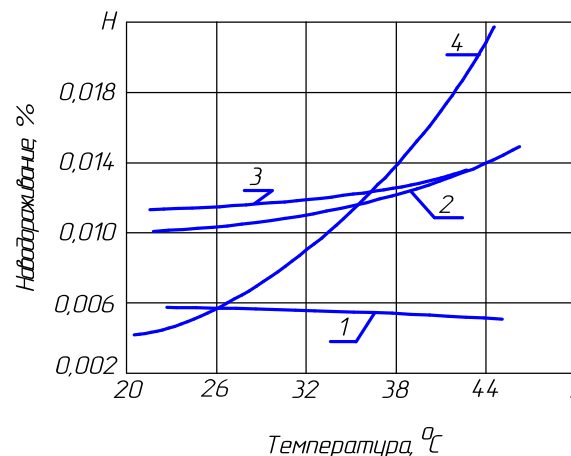


Рис.6. Зависимость наводороживания поверхности образцов из сплава ВТ9 от скважности импульсов. Электролит 8% NaNO₃

Из представленных данных следует, что хотя наводороживание в присутствии ПАВ увеличивается, но не превышает допустимого значения (0,015%). Поэтому добавка поверхностно-активного вещества класса неололов в нитратных и хлорид-нитратных электролитах может быть эффективно использована для улучшения качества поверхности при обработке сплава ВТ9 методом импульсной ЭХО.

При импульсной ЭХО закономерности формирования поверхностного слоя, определяющие наводороживание в процессе обработки, существенно отличаются от обработки на постоянном токе. Источником наводороживания титановых сплавов в нитратах и хлорид-нитратных растворах является водород, генерируемый на аноде по механизму адсорбции анодного атомарного водорода и его проникновения в поверхностный слой. Минимальное содержание водорода в поверхностном слое может быть по-

лучено при импульсной ЭХО титановых сплавов в электролитах на основе нитратов. При использовании хлорид-нитратных смесей на оптимальных режимах обеспечивается наводороживание не выше допустимых пределов. Рекомендуется добавка в электролиты при импульсной ЭХО титановых сплавов поверхностно - активных веществ в количестве 0,1...0,15 %.

Обработка титановых сплавов ВТ9 в нитратах и хлорид-нитратных растворах с допустимым наводороживанием поверхностного слоя обеспечивается при следующих оптимальных режимах: межэлектродный зазор 0,05...0,1 мм; напряжение на электродах 20...30 В; температура электролита 28...35°C; длительность импульса 0,8...1,5 мс, скважность импульса 3...4.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что для достижения главного параметра ЭХО – точности формообразования и удержания величины наводороживания обработанной поверхности титанового сплава на допустимом уровне при обеспечении приемлемой производительности процесса необходимо получить аналитическую зависимость наводороживания от основных параметров импульсной ЭХО.

При этом нами были учтены результаты исследования влияния основных факторов ЭХО на наводороживание, которые позволили определить диапазон изменения факторов. Для определения аналитической зависимости основных факторов от наводороживания от режимов ЭХО нами было проведено планирование экспериментов. Температура из числа факторов исключалась, так как ее влияние незначительно. В соответствии с результатами экспериментальных исследований катодных и анодных процессов, которые протекают при электрохимической обработке титановых сплавов, было установлено, что при использовании хлорид-нитратных смесей снижается газонаполнение электролита по водороду, а также повышается выход по току на аноде. Это же подтвердили и наши эксперименты, описанные выше. Среди этих составов минимальное катодное газовыделение выявлено при использовании смеси хлористого натрия и азотнокислого аммония. Поэтому в качестве электролита в исследованиях применялись

водные растворы указанной смеси в соотношении 1,4:1,1. Верхние и нижние уровни факторов выбирались исходя из реального диапазона их изменения для обеспечения высокой точности формообразования:

- длительность импульса,
- скважность импульсов;
- межэлектродный зазор;
- суммарная концентрация электролита;
- напряжение на электродах.

При этом использовался дробный факторный эксперимент с полурепликой 2^{5-1} (16 опытов). При выборе полуреплики 2^{5-1} имеется множество вариантов планирования, x_5 можно приравнять одному из шести парных взаимодействий или одному из четырех тройных взаимодействий, при этом линейные эффекты будут смешаны с двойными или тройными взаимодействиями. Наиболее рациональным в данной задаче будет выбор генерирующего соотношения, при котором фактор x_5 приравнен к взаимодействию, которым можно пренебречь $x_5 = x_1x_2x_3x_4$. При этом модель обладает наибольшей разрешающей способностью, определяющим контрастом является выражение $I = x_1x_2x_3x_4x_5$, и коэффициенты модели определяются оценками, смешанными с эффектами взаимодействия, близкими к нулю. Такие взаимодействия являются незначительными и ими можно пренебречь [5]. Принятые в исследовании уровни факторов и их кодированные обозначения приведены в таблице.

Принятое кодирование переменных необходимо для получения ортогональной матрицы планирования, позволяющей при математической обработке результатов эксперимента искомые коэффициенты определять независимо друг от друга.

Построение матрицы планирования и обработка результатов осуществлялись по методике, изложенной в работе [5]. Число параллельных опытов принималось равным $n = 2$. Это можно считать достаточным, тем более, что результаты опытов дополняют друг друга. Было принято решение аппроксимировать зависимость наводороживания $\%H = f(T, Q, a, U, t_u)$ линейной зависимостью, потому что в первом приближении по данным [2] она удовлетворительно описывает процесс наводороживания.

Таблица. Область исследуемых режимов

Факторы	Кодовые обозначения факторов	Натуральные уровни факторов, соответствующие кодированным	
		нижний -1	верхний +1
Длительность импульса t_w , мс	x_1	0,06	2,0
Скважность импульсов, q	x_2	2	6
Зазор a , мм	x_3	0,04	0,2
Концентрация электролита, %	x_4	5	25
Напряжение U , В	x_5	12	25

В результате проведенного исследования получено уравнение регрессии следующего вида:

$$y = 0,0527 + 0,00025X_1 + 0,000875X_2 - 0,00264X_3 + 0,00025X_4 - 0,000501X_5 \quad (1)$$

Проводилась проверка адекватности уравнения (1) и значимости коэффициентов. С целью оценки отклонения параметра оптимизации от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычислялась дисперсия S_j опыта по результатам параллельных опытов и проверялась однородность дисперсий. При равномерном дублировании опытов однородность ряда дисперсий проверялась с помощью критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий. Результаты проверки показали однородность дисперсии. Вычислялась дисперсия воспроизводимости S_y^2 . Проверялась значимость коэффициентов модели сравнением абсолютной величины коэффициентов с доверительным интервалом. Проверка показала, что все коэффициенты уравнения (1) значимы. Для проверки адекватности уравнения (1) вычислялась дисперсия адекватности. Остаточная дисперсия, или дисперсия адекватности, характеризует рассеяние эмпирических значений \bar{y} относительно расчетных \hat{y} , определенных по найденному уравнению регрессии. Далее проводилась проверка гипотезы адекватности найденной модели. Проверку этой гипотезы проводили по F-критерию Фишера

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$$

Если значение $F_p < F_m$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считается адекватной. Значение F_m берется из таблицы 12 [5]. В нашем случае $F_p = 1,77 < F_m = 2,4$ при 5% уровне значимости, то есть модель адекватна. Следовательно, зависимость наводороживания поверхности от исследуемых факторов импульсной ЭХО с достаточной точностью можно представить уравнением (1). С помощью данной зависимости, во-первых, можно определить ожидаемый уровень содержания водорода в поверхности при выбранных оптимальных с точки зрения точности формообразования пера режимах обработки. Во-вторых, с ее помощью можно корректировать данные режимы обработки в сторону меньших значений наводороживания, если они не обеспечивают предельно допустимый уровень содержания водорода.

Библиографический список

1. А.с. 655497. СССР, МКИ³ В23Р1/04// Способ электрохимической размерной обработки подвижными электродами /Смирнов Г.В., Бороздин Б.П., Филимошин В.Г., Несмелов Б.М., Шипов Ю.С., Шулепов А.П. (СССР). №2540215/ 25-08; Заявл. 09.11.77; Опубл. 05.04.79, Бюл. №13 //Открытия. Изобретения. 1979. №13.
2. Проничев Н. Д. Разработка методологии и принципов проектирования технологии электрохимической обработки высоконагруженных деталей ГТД: Дис. ... докт. техн. наук. - Самара, 1997.

3. Смирнов Г.В., Проничев Н.Д., Богданович В.И., Шитарев И.Л. Наводораживание титановых сплавов при электрохимической размерной обработке.- Издательство Самарского научного центра РАН, 1999. – 128 с.

4 Седыкин Ф. В., Никифоров А. В., Бородин В. В., Проничев Н. Д. Методы уменьшения наводораживания титановых сплавов при электрохимической обработке./ Производственно-технический бюллетень.- 1977. № 9. - С. 29-32.

5. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

References

1. Smirnov G.V., Borozdin B.P., Filimoshin V.G. et al. Electrochemical dimensional machining by removable electrode. USSR pa-

tent 655497, ИС В23Р1/04//. Discoveries and Inventions #13, 1979.

2. Pronichev N.D. Methodology and designing principles development for electrochemical machining of high-loaded gas turbine engine components. Thesis for Doctor of Engineering Science. Samara, 1997.

3. Smirnov G.V., Pronichev N.D., Bogdanovich V.I et al. Hydrogen saturation of titanium alloys in electrochemical dimensional machining. Samara: “SSC RSA Publishment”, 1997.

4. Sedykin F.V., Nikiforov A.V., et al. Methods of hydrogen saturation reduction in electrochemical machining. Production and technical newsletter №9, 1977. 29-32.

5. Spiridonov A.A. Planning an Experiment in Technological Process Researches. Moscow: “Mashinostroenie”, 1981.

HYDROGENIUM SATURATION RESEARCH FOR FINISHING PULSED ELECTROCHEMICAL MACHINING OF TITAN ALLOY (BT9) TJ BLADES

© 2008 G. V. Smirnov

Samara State Aerospace University

Hydrogenium saturation of a machined surface for finished pulsed electrochemical machining (ECM) of titan alloy (BT9) TJ blades is an important problem of modern aviation propulsion engineering. The article gives the results technological factors research influence on Hydrogenium saturation of the processed surface. The equation of regression for Hydrogenium saturation and based technological factors of finished pulsed ECM was presented. The fields of the application of the research results are discussed.

Hydrogen saturation, pulse, method, shaping, blade, compressor, alloy

Информация об авторах

Смирнов Геннадий Владиславович, доктор технических наук, профессор кафедры производства двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: pdla@ssau.ru. Область научных интересов: электрохимическая обработка деталей ГТД.

Smirnov Gennadiy Vladislavovich, Doctor of Engineering Science - professor of Samara State Aerospace University “Mechanical Material Working” department. E-mail: pdla@ssau.ru. Area of research: electrochemical processing of gas turbine engine components.