

УДК 621.9.047

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

© 2004 Г.В. Смирнов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрена актуальная проблема современного авиадвигателестроения – наводораживание обрабатываемой поверхности при импульсной окончательной электрохимической обработке (ЭХО) пера лопаток ГТД из титанового сплава ВТ9. Приведены результаты исследования наводораживания при окончательной импульсной ЭХО от технологических факторов. Представлено уравнение регрессии, связывающее наводораживание 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. Это, в частности, подтверждается усталостными испытаниями лопаток, обработанных по данной технологии. Однако применение импульсной ЭХО в качестве окончательной затруднено. Во-первых, из-за низкой точности размеров (первого и второго рода) пера после ЭХО и значительной шероховатости обработанной поверхности. Во-вторых, из-за повышения риска наводораживания обработанной поверхности после ЭХО. И наконец, из-за осложнения условий формообразования при ЭХО вследствие использования в качестве заготовок лопатки, полученные методом высокоскоростной штамповки. Заготовки ВСШ отличаются меньшей величиной минимального припуска (до 0,4...0,7 мм) при значительной его неравномерности (до 1,3 мм).

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]. 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 наводораживания поверхности после обработки. Поэтому в нашем случае было принято решение приоритетным считать обеспечение заданной точности. Но определить влияние различных параметров ЭХО на наводораживание 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 наводораживания будет превышать этот предел, то корректировать режимы в сторону снижения наводораживания. Исследованию точности формообразования титановых сплавов и шероховатости обработанной поверхности при импульсной ЭХО посвящены многочисленные исследования. Наиболее обстоятельная из них – работа [2]. В результате комп-

лексных 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 $R_a=0,38...0,33$ 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 неонолов 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 образцов из титанового сплава ВТ9, имеющих площадь 1 см^2 . В исходном состоянии образцы имели содержание водорода $0,005\%$, шероховатость поверхности $R_a = 2,5$ 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 на малых зазорах, которые являются основным рабочим диапазоном зазоров при импульсной ЭХО ($0,1...0,2$ мм). Однако, при уменьшении зазоров до $0,04...0,06$ мм (в области сверхмалых зазоров, на которых ЭХО лопаток сопряжена с риском коротких замыканий, и в то же время повышения избирательности

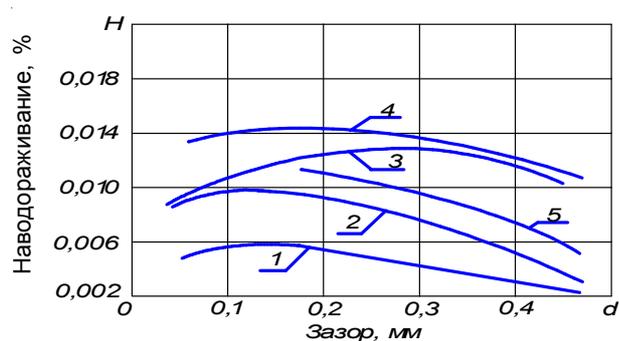


Рис. 1. Зависимость наводороживания сплава ВТ9 от межэлектродного зазора в различных электролитах: 1 – 3% NaCl+2% NaNO₃; 2 – 3% NaCl+2% NaNO₃ + 0,1% ПАВ; 3 – 9% NaCl + 6% NaNO₃ + 0,1% ПАВ; 4 – 15% NaCl + 10% NaNO₃ + 0,1% ПАВ; 5 – 15% NaCl+ 10% NaNO₃ + 0,1% ПАВ (постоянный ток)

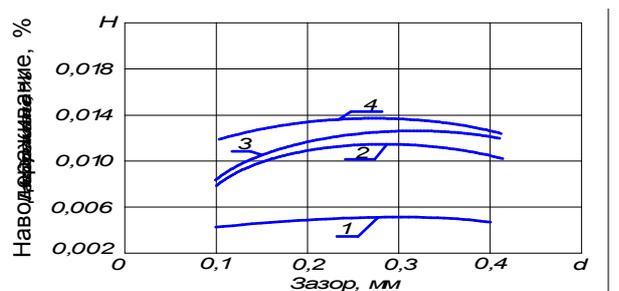


Рис. 2. Зависимость наводороживания сплава ВТ9 от межэлектродного зазора в нитратных электролитах: 1 – 6% NaNO₃; 2 – 6% NaNO₃+0,1% ПАВ, 3 – 10% NaNO₃; 4 – 10% NaNO₃+0,1% ПАВ

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...0,5 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.

Увеличение концентрации электролита, вызывает увеличение наводороживания (рис. 2), что противоположно тенденции на постоянном токе а следовательно накладывает ограничения на максимально возможную производительность процесса. Характер полученной зависимости можно объяснить увеличением потенциала пробоя окисной пленки и увеличению установившегося потенциала при прохождении импульса. А это создает неблагоприятные условия электрохимического восстановления нитрат-иона. Введение ПАВ24-30 в электролит незначительно повышает уровень наводороживания по видимому за счет того же механизма, учитывая, что ПАВ изменяет распределение потенциалов.

При увеличении рабочего напряжения на электродах возрастает интенсивность электродных процессов, связанных с растворением металла так и электрохимическим восстановлением нитрат-иона (NO_3^-) (рис. 3). По данным [5] увеличение плотности тока

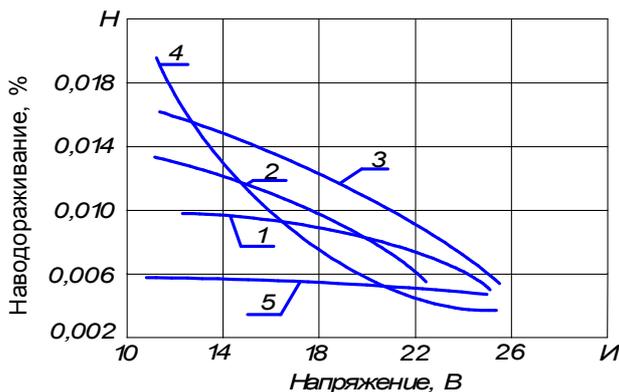


Рис. 3. Зависимость наводороживания сплава ВТ9 от напряжения на электродах:
 1 - 3%NaCl+2%NaNO₃; 2 - 15% NaCl + 10% NaNO₃; 3 - 15% NaCl + 10% NaNO₃+0,1%ПАВ; 4 - 15% NaCl + 10% NaNO₃(пост. ток); 5 - 5% NH₄No₃

(напряжения) приводит к увеличению общей скорости газовыделения, в том числе азота – продукта восстановления NO_3^- и снижению скорости выделения водорода. То есть, увеличение напряжения способствует замене реакций разряда водорода на реакцию восстановления окислителя, что и приводит к снижению наводороживания, как в случае ЭХО на постоянном токе. На рис. 4 приведены зависимости наводороживания 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 наводороживания значительно меньше, чем при ЭХО на постоянном токе, т.е. нагрев даже до температуры 45°C не ве-

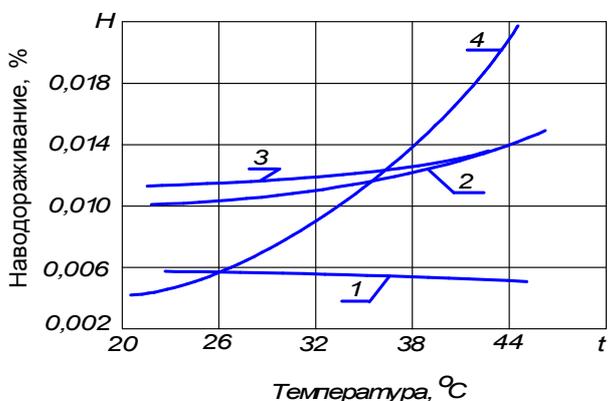


Рис. 4. Зависимость наводороживания сплава ВТ9 от температуры электролита при обработке в различных электролитах:
 1 - 3%NaCl+2%NaNO₃;
 2 - 3%NaCl+2%NaNO₃+0,1%ПАВ;
 3 - 12% NaCl+8% NaNO₃+0,1%ПАВ;
 4 - 12% NaCl+8% NaNO₃(постоянный ток)

дет к существенному увеличению наводораживания. То есть температура электролита при импульсной обработке титана не влияет на перераспределение скоростей выделения водорода и восстановления окислителя NO_3^- . 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, 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 выше приведенных данных и распределений можно предположить, что в этих условиях реакции восстановления NO_3^- замещается на реакцию восстановления

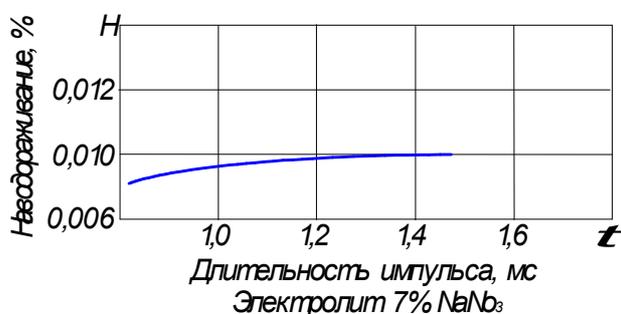


Рис. 5. Зависимость наводораживания поверхности образцов из сплава ВТ9 от длительности импульса

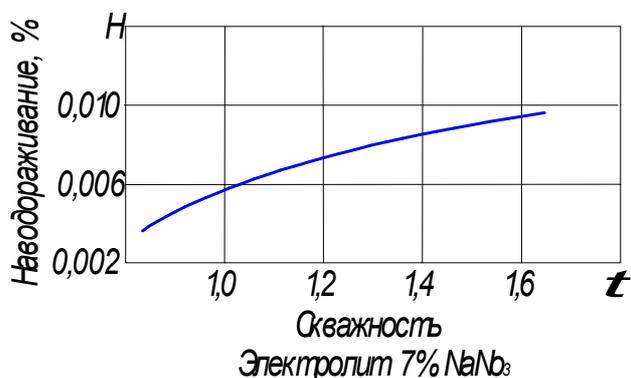


Рис. 6. Зависимость наводораживания поверхности образцов из сплава ВТ9 от скважности импульсов

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 I. 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 хлорид-нитратных электролитах отмечается на аноде выделение водорода, было важно определить влияние ПАВ на наводораживание поверхности. При этом если ПАВ будет способствовать более быстрому удалению пузырьков водорода с поверхности растворяющегося металла, то наводораживание будет уменьшаться, в противном случае – возрастать. Из зависимостей, показанных на рис. 3, 2, 1, 4 можно видеть, что введение ПАВ приводит к увеличению наводораживания поверхности. Важно отметить, что характер зависимостей наводораживания от зазора, напряжения и температуры электролита при введении ПАВ в электролит не нарушается, что свидетельствует о сохранении основных закономерностей наводораживания ВТ9 в этих условиях. Из представленных данных следует, что хотя наводораживание 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 8Т9 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 получено 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 °С; длительность импульса 0,8...1,5мс, 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 резуль-

татом экспериментальных исследования 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.

- 1 – длительность импульса,
- 2 –скважность импульса;
- 3 – межэлектродный зазор;
- 4 – суммарная концентрация электролита;
- 5 - 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 6 парных взаимодействий или одному из 4 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 $x_5 = x_1 x_2 x_3 x_4$. При этом модель обладает наибольшей разрешающей способностью, определяющим контрастом является выражение $1 = x_1 x_2 x_3 x_4 x_5$ и коэффициенты модели определяются оценками, смешанными с эффектами взаимодействия, близкими к нулю. Такие взаимодействия являются несущественными и ими можно пренебречь [5]. Принятые в исследовании уровни факторов и их кодированные обозначения приведены в табл. 1.

Принятое кодирование переменных необходимо для получения ортогональной матрицы планирования, позволяющей при мате-

Таблица 1. Область исследуемых режимов

Факторы	Кодовые обозначения факторов	Натуральные уровни факторов, соответствующие кодированным	
		нижний -1	верхний +1
Длительность импульса t_n , мс.	x_1	0,06	2,0
Скважность импульса, 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

математической обработке результатов эксперимента искомые коэффициенты определять независимо друг от друга.

Построение матрицы планирования и обработка результатов осуществлялось 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 наводораживания $\%H = f(T, Q, a, U, t_u)$ линейной зависимостью, потому, что в первом приближении по данным [2] она удовлетворительно описывает процесс наводораживания.

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 дисперсию 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

$F_p < F_t$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считается адекватной. Значение F_t берется из таблицы 12 [5]. В нашем случае $F_p = 1,77 < F_t = 2,4$ при 5% уровне значимости, то есть модель адекватна. Следовательно, зависимость наводораживания 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 повер-

хности, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Наводороживание титановых сплавов при электрохимической размерной обработке. Самара: СНЦ РАН, 1999.
4. Седыкин Ф. В., Никифоров А. В., Бороздин В. В., Проничев Н.Д. Методы уменьшения наводороживания титановых сплавов при электрохимической обработке // Производственно-технический бюллетень. 1977. № 9.
5. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.

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

© 2004 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.