

УДК 621.9.047

В. А. ЗАЙЦЕВ, Т. Р. ИДРИСОВ, А. Н. ЗАЙЦЕВ

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ТОЧНОСТЬ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МИКРОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА

На основе теоретических и экспериментальных исследований высокоскоростного анодного растворения импульсами тока микросекундной длительности при дополнительной поляризации электродов током малой плотности прямой и обратной полярности выявлены условия достижения наибольшей точности копирования и высокого качества поверхности. *Электрохимическая обработка; электродный потенциал; анодное растворение; качество поверхности*

ВВЕДЕНИЕ

Малоразмерные детали и конструктивные элементы с характерным размером порядка 1 мм находят широкое применение в различных отраслях промышленности и в ряде случаев определяют современный уровень технического прогресса в медицинской и электронной технике, приборостроении, в ряде областей высоких технологий.

Традиционные электрофизические и механические методы обработки для изготовления такого рода деталей не всегда приемлемы. Они либо не обеспечивают требуемой точности и шероховатости поверхности, либо приводят к недопустимым изменениям физико-механических свойств поверхностного слоя, возникновению заусенцев и острых кромок.

Одним из путей решения этой проблемы является применение импульсной электрохимической обработки (ЭХО) [1, 2]. Однако в настоящее время уровень ее технической реализации в промышленности недостаточно высок. На лучших серийных образцах станков может быть достигнута шероховатость $R_a 0,2..0,8$ мкм, погрешность обработки $\pm 10..20$ мкм, что не позволяет в полной мере охватить номенклатуру рассматриваемого класса деталей.

В данной статье решается задача повышения точности и качества поверхности за счет использования дополнительной поляризации электродов при ЭХО импульсными токами микросекундного диапазона длительностей.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ТОКА

Технологические характеристики ЭХО определяются электродными процессами, которые протекают на поверхностях анода и катода. В условиях импульсной ЭХО необходимо знать закономерности изменений катодного и анодного потенциалов в зависимости от плотности тока и времени, особенно при использовании импульсов напряжения или тока микросекундной длительности, когда время установления электродных потенциалов соизмеримо с длительностью импульса.

Для измерения электродных потенциалов использовался метод разрыва электрической цепи тока, когда потенциал измеряется после быстрого отключения тока [3]. Данный метод обладает более высокой точностью по сравнению с прямым методом при высоких плотностях тока. Однако метод разрыва цепи тока сложен в реализации и при использовании несовершенного оборудования возникает погрешность, связанная с изменением потенциала в течение выключения тока. Поэтому была усовершенствована методика и разработано электронное оборудование для определения зависимостей анодного и катодного потенциалов от длительности (5..100 мкс) поляризации и плотности тока (до 100 А/см²) с использованием метода разрыва электрической цепи тока [4]. Точность измерения электродных потенциалов была повышена за счет

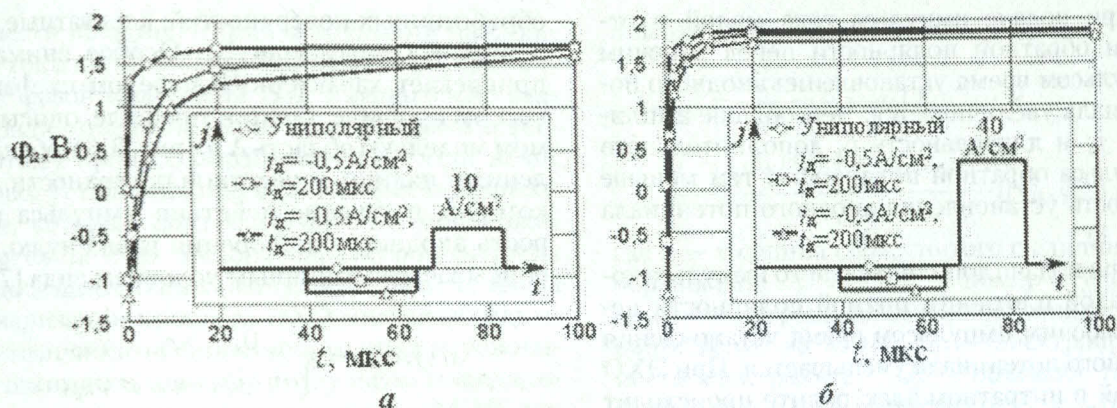


Рис. 1. Зависимости анодных потенциалов стали 40X13 от длительности рабочего импульса (плотность тока 10 (а) и 40 А/см² (б)) в 15%-ном растворе NaNO₃ при различных параметрах дополнительного импульса обратной поляризации

уменьшения времени разрыва электрической цепи тока до 10^{-8} с и применения математических методов обработки сигналов.

Были получены экспериментальные зависимости и математические модели электродных потенциалов от длительности поляризации и плотности рабочего тока для различных материалов электродов и электролитов при различных знаке и интенсивности дополнительной поляризации током малой плотности. При этом показано, что зависимости анодного потенциала $\varphi_a(t, j)$ в активирующем хлоридном электролите NaCl при равных температурах и электропроводностях располагаются ниже, чем в пассивирующем кислотосодержащем NaNO₃, что объясняется активирующим действием хлорид ионов [5]. В хлоридном электролите на поверхности катода преимущественно протекает реакция выделения водорода, поэтому материал катода незначительно влияет на перенапряжение катодной реакции. В нитратном электролите зависимости катодного потенциала от длитель-

ности поляризации располагаются выше, чем в хлоридном, что может быть связано с реакцией восстановления нитрат-иона NO₃⁻, протекающей с меньшим перенапряжением. При высоких плотностях тока (> 50 А/см²) при условии, что анодный потенциал перед импульсом имеет стационарное значение для таких материалов, как железо, никель, стали 40X13 и 12X18Н10Т, в процессе установления анодный потенциал проходит через максимум, что связано с одновременным протеканием процессов заряда и изменения емкости двойного электрического слоя [6].

Увеличение температуры электролита с 20 до 50°C, давления в межэлектродном промежутке (МЭП) от 0 до 2,5 МПа и pH с 7 до 2 незначительно влияет на зависимости $\varphi_a(t, j)$. При изменении значения pH электролита с 7 до 10 наблюдается увеличение анодного потенциала в начальный момент времени с последующим снижением, которое может быть связано с подкислением прианодного слоя в течение импульса.

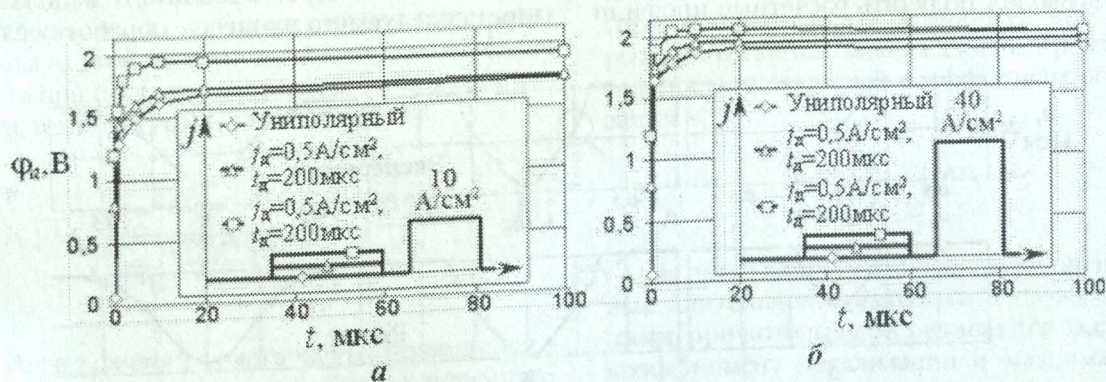


Рис. 2. Зависимости анодных потенциалов стали 40X13 от длительности рабочего импульса (плотность тока 10 (а) и 40 А/см² (б)) в 15%-ном растворе NaNO₃ при различных параметрах дополнительного импульса прямой поляризации

При подаче импульса тока малой плотности обратной полярности перед рабочим импульсом время установления анодного потенциала увеличивается. Чем больше амплитуда j_d и длительность t_d дополнительного импульса обратной полярности, тем меньше скорость установления анодного потенциала (рис. 1).

При подаче дополнительного импульса тока малой плотности прямой полярности перед рабочим импульсом время установления анодного потенциала уменьшается. При ЭХО сталей в нитратном электролите происходит подъем кривых установления анодного потенциала в рабочем импульсе, связанный с пассивацией анода в течение дополнительного импульса (рис. 2).

2. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭХО ИМПУЛЬСАМИ БИПОЛЯРНОГО ТОКА МИКРОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Рассмотрен случай копирования полусферического электрода-инструмента (ЭИ). Данная схема охватывает наиболее сложные аспекты операций электрохимического копирования и допускает получение удобного для анализа аналитического решения. Разработана математическая модель процесса электрохимического формообразования микросекундными импульсами тока с учетом полученных зависимостей анодного и катодного потенциалов от длительности импульса и плотности тока при изменении температуры и газонаполнения электролита в условиях полного восстановления межэлектродной среды и состояния поверхности электродов в паузах между импульсами.

Учет зависимостей электродных потенциалов от длительности импульса и плотности тока позволил получить расчетные профили

обработанных поверхностей, адекватные экспериментальным (рис. 3). Особое внимание привлекает характерный перелом на фактическом профиле лунки и профиле, описываемом моделью (область А на рис. 3, б), обусловленный наличием участков поверхности, для которых в течение действия импульса скорость анодного растворения равна нулю, что описывается граничным условием вида [7]

$$\eta(j, \varphi_a) = \begin{cases} 0, & \varphi_a < \varphi_{ар}, \\ \eta(j), & \varphi_a \geq \varphi_{ар}, \end{cases} \quad (1)$$

где η — выход по току, $\varphi_{ар}$ — величина потенциала растворения.

В качестве параметра, характеризующего точность копирования, предложено использовать отношение величины h/d (h — глубина лунки, d — диаметр лунки) для исследуемого процесса к h_i/d_i для идеального сегмента сферы. В рассматриваемых условиях при длительности импульса 20–30 мкс достигается наибольшая точность копирования (рис. 4). При длительности импульсов меньше 20 мкс точность копирования низкая, так как большая часть электричества тратится на заряд емкости двойного электрического слоя, а процесс растворения начинается неравномерно на отдельных микроучастках обрабатываемой поверхности. В математической модели это явление не учитывается, поэтому при длительностях импульсов меньше 20 мкс расчетные и экспериментальные данные отличаются (см. рис. 4). С увеличением длительности импульса более 30 мкс локализация процесса снижается за счет того, что анодный потенциал достигает потенциала растворения на все большей площади обрабатываемой поверхности.

Для достижения производительности, достаточной для промышленного использования исследуемого процесса, обработку следу-

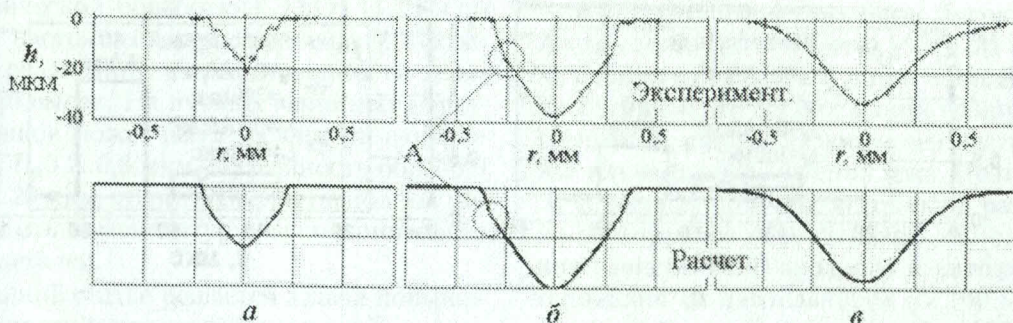


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные профили лунок. Условия экспериментов: материал ЭИ и электрода-заготовки — сталь 12Х18Н10Т, электролит — 5% NaCl, радиус ЭИ $r = 0,75$ мм, величина МЭЭ $s = 100$ мкм, количество электричества в каждом эксперименте одинаково. Амплитуда импульса 8 В, длительность t равна 15 (а), 30 (б) и 100 мкс (в)

ет вести не одиночными, а группами импульсов тока, синхронизированными с определенной фазой колебания ЭИ. Исключение взаимовлияния импульсов не всегда возможно, поэтому процесс обработки ведут при некоторых установившихся значениях поляризации, которые контролируются и поддерживаются за счет выбора параметров рабочих и дополнительных импульсов. Для анализа локализации процесса ЭХО микросекундными импульсами биполярного тока в условиях взаимного влияния импульсов моделировались процессы, происходящие в МЭП, который состоит из двух участков с различной величиной межэлектродного зазора. Каждый из участков представляет собой пространство, заполненное неподвижным электролитом. На электроды подается импульс напряжения прямоугольной формы. Расчет каждого участка проводится независимо.



Рис. 4. Зависимость отношения h/d к h_i/d_i от длительности импульса (условия эксперимента см. рис. 3)

В качестве числового безразмерного параметра, характеризующего локализацию анодного растворения, было выбрано отношение величины $\frac{1}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right|$ для исследуемого процесса (V_{ecm} — скорость электрохимического растворения, s — величина межэлектродного зазора) к этой же величине, которая имела бы место при постоянстве электродных потенциалов, температуры и газовыделения:

$$k_{\text{loc}} = \frac{\frac{1}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right|}{\frac{1}{V_{\text{ecm}}^{\text{ideal}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}^{\text{ideal}}}{ds} \right|} = \frac{s}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right|. \quad (2)$$

Расчет скорости растворения проводился с учетом зависимостей электродных потенциалов от длительности поляризации и плотности тока, выделения газа и повышения температуры электролита, а также изменения формы зависимостей анодного и катодного потен-

циалов при подаче серии импульсов

$$V_{\text{ecm}i} = \frac{dz_i}{dt} = k_{\text{ecm}} \sigma_i (T_i, C_{g_i}) \times \frac{U - (\varphi_a(t, j_i) + \varphi_k(t, j_i))}{s_i} \eta(j_i, \varphi_{a_i}), \quad (3)$$

где z — толщина слоя, снятого с единицы поверхности; $i = 1, 2$ — номер ступеньки; k_{ecm} — электрохимическая постоянная; U — напряжение на МЭП; σ_i — электропроводность электролита; C_g — объемное газонаполнение, T — температура; $\varphi_{a,k}(t, j)$ — зависимости, полученные путем аппроксимации данных (см. рис. 1, 2).

Проведенные исследования показали высокую информативность предложенного критерия оценки локализации k_{loc} . Зависимости k_{loc} от различных параметров обработки (длительности импульса, паузы между импульсами, межэлектродного зазора и др.) могут носить экстремальный характер, например, нагрев электролита увеличивает, а выделение газа снижает коэффициент локализации. При увеличении длительности импульса начинает преобладать влияние газонаполнения. В этом случае величина k_{loc} начинает уменьшаться и при некоторых условиях может стать меньше единицы, т. е. будет происходить снижение точности копирования.

При получении зависимостей k_{loc} от параметров обработки при ЭХО группами импульсов биполярного тока учитывался известный факт, что импульсы обратной полярности обеспечивают ускоренный спад электродных потенциалов в паузе между рабочими импульсами.

В частном случае задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: определить длительность паузы $t_{\text{п}}$ и длительность рабочего импульса тока $t_{\text{р}}$ (при прочих равных условиях), при которых достигаются максимальная производительность и заданный коэффициент локализации k_{loc}^* :

$$\begin{cases} V_{\text{ecm}} \rightarrow \max, \\ k_{\text{loc}} \geq k_{\text{loc}}^*. \end{cases} \quad (4)$$

Из рис. 5 видно, что существуют оптимальные длительности импульса и паузы между ними, при которых обеспечиваются заданный коэффициент локализации и максимальная производительность.

Установлено, что в условиях ЭХО хромосодержащих сталей при подаче дополнительного импульса тока обратной полярности

снижается шероховатость поверхности с достижением зеркального блеска (рис. 6, б), увеличивается содержание хрома в поверхностном слое по сравнению с основой в 1,3..2 раза (по результатам исследований поверхности методом вторично-ионной масс-спектрографии), в ряде случаев создается слой хрома с толщиной 50..100 атомных слоев, что способствует повышению коррозионной стойкости детали [8]. Данный режим можно использовать как финишный для получения высокого качества поверхности.

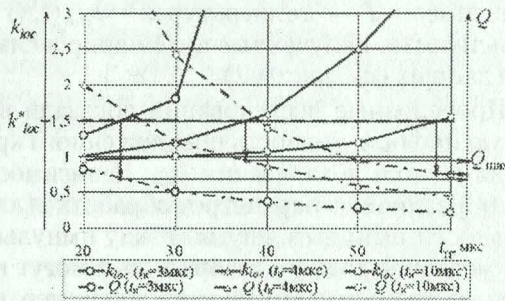


Рис. 5. Зависимости коэффициента локализации и производительности от длительности паузы между импульсами при различных длительностях импульсов. $k_{лос}^*$ — заданный коэффициент локализации

Были проведены комплексные сравнительные исследования по точности обработки, качеству поверхности, энергоемкости и производительности процесса ЭХО с использованием дополнительных импульсов прямой и обратной полярности. Установлено, что подача импульса тока малой плотности прямой полярности способствует снижению погрешности копирования на 30–50%, шероховатости поверхности на 10–20% по сравнению с униполярной ЭХО при одинаковых параметрах рабочего импульса. При этом на 10–30% увеличивается энергоемкость процесса. При подаче дополнительных импульсов обратной полярности в паузах между рабочими импульсами наблюдается существенное в 2–4

раза снижение шероховатости поверхности и повышение точности копирования в 1,5–2,5 раза по сравнению с униполярной ЭХО. При этом снижается производительность процесса на 20–60%.

ВЫВОДЫ

На основе теоретических и экспериментальных исследований высокоскоростного анодного растворения импульсами тока микросекундной длительности при дополнительной поляризации электродов током малой плотности прямой и обратной полярности выявлены условия, обеспечивающие достижение наибольшей точности копирования и высокого качества поверхности.

1. Установлено, что при подаче дополнительного импульса тока обратной полярности перед рабочим импульсом увеличивается время установления электродных потенциалов. При этом чем ниже плотность рабочего тока на участке обрабатываемой поверхности, тем в большей степени влияет дополнительный импульс на установление потенциалов, т.е. увеличивается неэквивалентность обрабатываемой поверхности и повышается локализация процесса растворения.

2. Установлено, что при ЭХО сталей в нитратном электролите подача дополнительного импульса тока малой плотности прямой полярности перед рабочим импульсом приводит к пассивации обрабатываемой поверхности, в результате чего увеличивается установившееся значение анодного потенциала. При этом за счет выбора таких параметров рабочего и дополнительного импульсов тока, при которых процесс активации и растворения будет происходить на участках поверхности, наиболее приближенных к ЭИ, повышается точность обработки.

3. Установлено, что в условиях ЭХО хромосодержащих сталей при определенных параметрах импульса обратной полярности про-

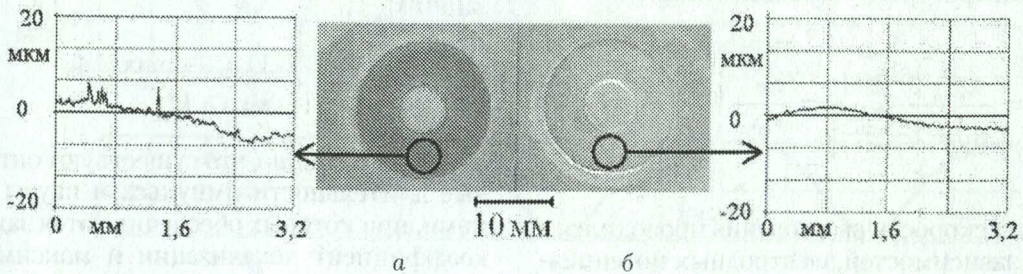


Рис. 6. Общий вид и профили поверхностей после униполярной (а) и биполярной (б) ЭХО. Материал — сталь 40X13, электролит — 8% NaNO_3

исходит увеличение содержания хрома в поверхностном слое либо полное покрытие обработанной поверхности хромом. При этом существенно (R_a менее 0,1 мкм) снижается шероховатость обработанной поверхности и уменьшается потенциал растворения материала, что приводит к снижению энергоемкости процесса.

4. Разработана модель формообразования при ЭХО микросекундными импульсами биполярного тока с учетом зависимостей анодного и катодного потенциалов от длительности поляризации и плотности тока и влияния на анодный потенциал дополнительного импульса обратной полярности, а также изменения температуры и газонаполнения электролита в МЭП. Поставлена и решена задача оптимизации параметров импульсов для достижения максимальной производительности при заданном коэффициенте локализации.

5. Установлено, что подача дополнительного импульса тока малой плотности прямой полярности способствует снижению погрешности копирования на 30–50%, шероховатости поверхности на 10–20% по сравнению с униполярной ЭХО при одинаковых параметрах рабочего импульса. При этом на 10–30% увеличивается энергоемкость процесса.

6. Установлено, что при подаче дополнительных импульсов обратной полярности в паузах между рабочими импульсами наблюдается существенное в 2–4 раза снижение шероховатости поверхности и повышение точности копирования в 1,5–2,5 раза по сравнению с униполярной ЭХО. При этом снижается производительность процесса на 20–60%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбалко А. В., Дикусар А. И. Электрохимическая обработка импульсами микросекундного диапазона // *Электрохимия*. 1994. Т. 30. № 4. С. 490–498.
2. Галанин С. И. Электрохимическая обработка металлов и сплавов микросекундными импульсами тока. Кострома: КГТУ, 2001. 118 с.
3. Дикусар А. И., Энгельгардт Г. Р., Петренко В. И., Петров Ю. Н. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов. Кишинев: Штиинца, 1983. 207 с.
4. Идрисов Т. Р., Зайцев А. Н., Амирханова Н. А. Исследование электродных потенциалов в нестационарных условиях при биполярной электрохимической обработке // *Электронная обработка материалов*. 2001. № 1. С. 4–8.

5. Идрисов Т. Р., Зайцев А. Н., Амирханова Н. А. Развитие анодного процесса при наложении импульса тока малой длительности // *Электронная обработка материалов*. 2001. № 4. С. 4–8.
6. Амирханова Н. А., Идрисов Т. Р., Зайцев А. Н. Анодные процессы при наложении импульсов тока микросекундной длительности // *Современные электрохимические технологии в машиностроении: Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Иваново, 2001*. С. 11–12.
7. Идрисов Т. Р., Зайцев А. Н., Житников В. П. Моделирование электрохимической обработки микросекундными импульсами тока на примере копирования полусферы // *Современная электротехнология в машиностроении: Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Тула, 2002*. С. 116–123.
8. Идрисов Т. Р., Зайцев А. Н. Исследование физико-химических свойств обработанной поверхности после биполярной ЭХО // *Современные электрохимические технологии в машиностроении: Матер. IV Междунар. науч.-практ. сем. Иваново, 2003*. С. 18–20.

ОБ АВТОРАХ



Зайцев Вячеслав Александрович, аспирант каф. технол. машиностроения, мл. науч. сотр. Дипл. инж.-мех. по технол. машиностроения (УГАТУ, 2003). Готовит диссертацию в обл. электрохимической обработки материалов.



Идрисов Тимур Рашитович, науч. сотр. каф. ОиТСП. Дипл. магистр техн. и технол. (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по технол. и оборуд. механической и физ.-техн. обр-ки (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. электрохим. обр-ки материалов.



Зайцев Александр Николаевич, проф., дир. НИИ ПТТ ЭХО при УГАТУ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1972). Д-р техн. наук по процессам физ.-техн. обработки и САПР (защ. в Воронежск. политехн. ин-те, 1993). Иссл. в обл. электрофизической и электрохимической обработки материалов.