

УДК 621.793.7.001.5

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ  
ВАКУУМНЫМ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИМ АЗОТИРОВАНИЕМ  
В ПЛАЗМЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА**

*канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН (Полоцкий государственный университет),  
канд. техн. наук А.В. РУТКОВСКИЙ*

*(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев),  
канд. техн. наук, доц. М.С. АГЕЕВ (Херсонская государственная морская академия, Украина),  
д-р техн. наук, проф. В.И. МИРНЕНКО (Национальный университет обороны Украины  
им. Ивана Черняховского, Киев),*

*канд. техн. наук Т.В. СМИРНОВА (Центральноукраинский национальный технический  
университет, Кропивницкий),*

*канд. техн. наук, доц. О.В. РАДЬКО (Национальный авиационный университет, Киев)*

*В результате проведенных исследований установлены закономерности влияния параметров процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда на микротвердость, глубину диффузионного насыщения, величину и распределение остаточных напряжений в упрочненных слоях стальных поверхностей. На основе использования методов экспертных оценок и результатов серии отсеивающих экспериментов определены критерии оптимизации (предел выносливости и коррозионная стойкость) и управляемые факторы для математического моделирования формирования упрочненных ионноазотированных поверхностных слоев. Получена математическая модель процесса формирования упрочненных поверхностей вакуумным термоциклическим азотированием в плазме пульсирующего тлеющего разряда по критериям предела выносливости и коррозионной стойкости. Анализ последних исследований и публикаций показал отсутствие рекомендаций по выбору оптимальных технологических параметров вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда, которые использовались бы для практического применения этой технологии. Эти обстоятельства подтверждают необходимость дальнейшего изучения технологии вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда и целесообразность ее оптимизации.*

**Ключевые слова:** *вакуумное термоциклическое азотирование, математическая модель, технологический процесс, плазма, пульсирующий тлеющий разряд.*

**Введение.** На основе теории термоциклической усталости и явления аномального массопереноса при импульсном воздействии в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины разработана технология ускоренного азотирования в тлеющем разряде при циклическом изменении температуры за счет периодической подачи напряжения разряда [1–4]. Технология синтезирована на основе теории термоусталости, дискретно-импульсном вводе энергии в теплотехнологиях, эффекта аномального массопереноса при воздействии импульсных деформаций. Эффект аномального массопереноса обеспечивается термическими напряжениями, возникающими за счет циклических изменений температуры процесса. Теория термической усталости определяет условия получения величин термических напряжений, достаточных для ускорения диффузии азота в металл, но безопасных, чтобы не повредить изделие. Дискретно-импульсный ввод энергии ускорит нагрев в 2–5 раз, что позволяет увеличить термические напряжения и, соответственно, скорость диффузии азота [1–4]. Технология ускоренного азотирования в тлеющем разряде при циклическом изменении температуры за счет периодической подачи напряжения разряда основывается на эффективном решении комплекса взаимосвязанных научно-методологических проблем на границе термомеханики, металлофизики и теплофизики [1–4].

Вакуумное термоциклическое азотирование в плазме пульсирующего тлеющего разряда (ВТАППТР) следует рассматривать как альтернативу классической цементации с последующей закалкой. Следует подчеркнуть, что американский стандарт ASTM A 706 ограничивает и запрещает закалку с отпуском и финишной механической обработкой из-за технических сложностей и повышения стоимости. Новая технология не требует финишной механической обработки [1; 2; 4]. Главная особенность ВТАППТР – использование эффекта аномального массопереноса азота на поверхности обрабатываемой детали путем создания поля термических напряжений в поверхностном слое за счет циклического включения и исключения тлеющего разряда. Учитывая ускорение массопереноса при термоциклировании за счет возникновения термических напряжений, было принято решение разработать технологию химико-термической обработки (ХТО) на базе классической технологии ионного азотирования (ИА), которая во всем мире работает в изотермическом режиме. Технология ИА заключается в сокращении продолжительности ХТО, которая

относится к наиболее энергоемким в машиностроении. Предыдущие попытки создать технологию термоциклического ионного азотирования (ТЦИА) дали положительные результаты [1–4].

Технология ВТАППТР не использует печные устройства. Ионное азотирование по сравнению с печным имеет следующие преимущества: ускоряет диффузионные процессы в 1,1–2 раза; позволяет получать диффузный слой регулируемого состава и строения; характеризуется незначительными деформациями изделий и высоким качеством поверхности; дает возможность азотировать коррозионно-стойкие, жаропрочные и мартенситно-старяющиеся стали без дополнительной обработки; значительно сокращает время процесса за счет уменьшения времени нагрева и охлаждения; обладает большой экономичностью, повышает коэффициент использования электроэнергии, сокращает расход насыщающих газов; нетоксично и соответствует требованиям по защите окружающей среды [1–4].

В мировой практике для азотирования используют аммиак. Экологическое преимущество технологии ВТАППТР заключается в отказе от его применения. Обработка происходит тлеющим разрядом в смеси аргона с азотом. Этим также устраняется негативное влияние водорода на сердцевину детали – водородное охрупчивание и водородная коррозия. Замена классического газового азотирования в среде аммиака на технологию ВТАППТР в смеси азота и аргона обеспечивает сокращение продолжительности обработки в 10 раз [1–4]. В отличие от классических технологий ХТО технология ВТАППТР не создает сплошного нагрева детали, а обеспечивает нагрев только поверхностного слоя на глубину, необходимую для его упрочнения. Нагрев происходит за счет энергии тлеющего разряда, поэтому нет необходимости использовать печи [1–4].

Предложенная технология ВТАППТР, в отличие от классических технологий ХТО, позволяет снизить электрозатраты и уменьшить энергоемкость в 10 раз; сократить в 2–3 раза время обработки за счет отсутствия печных устройств и сквозного прогрева детали, пауз в электропитании в полцикле охлаждения детали, за счет циклического характера скоростного дискретного энерговода и ускорения диффузных процессов [1–4]. Таким образом, циклический характер нагрева изделия позволяет сократить в 2–5 раза необходимую мощность источников электрического питания и отнести технологию ВТАППТР к категории энергосберегающих. Кроме того, ВТАППТР повышает твердость поверхности на 20%, не меняет форму, размеры и шероховатость поверхности детали. Поэтому она используется без финишной заключительной механической обработки. Это значительно упрощает технологию производства при повышении долговечности и износостойкости детали в 4 раза, предела многоциклового усталости – на 25% [1–4].

**Основная часть.** *Оборудование для вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда.* Для исследования процесса ВТАППТР использовалась универсальная установка «ВИПа-1», разработанная в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины (рисунки 1) [1; 4].



Рисунок 1. – Установка для ВТАППТР

В установке используют абсолютно экологически чистый вакуумный процесс, потребление электроэнергии снижено в 4 и более раза, продолжительность процесса сокращена в 2 раза, отсутствуютковки деталей (особенно длинномерных) и хрупкость поверхностного слоя. Принцип работы вакуумного оборудования для проведения ВТАППТР основан на возможности ионизации газа, который подается в вакуумную камеру с последующим получением плазменно-химического соединения на поверхности детали. Таким образом, на поверхности детали получаются твердые растворы азота, при этом служебные свойства деталей (твердость, износостойкость и т.д.), а также их ресурс повышаются.

*Характеристика процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда.* Процесс ВТАППТР реализуется в две стадии: очистка поверхности перед азотированием и именно азотирование. Технологический процесс ВТАППТР сводится к следующим операциям [1–4]: 1) обезжиривания деталей; 2) установка деталей на устройстве, которое служит для местной защиты от азотирования (покрыть защитную поверхность металлическим и диэлектрической экраном). Зазор

между деталью и экраном допускается не более 0,3–0,5 мм; 3) установка в камеру печи деталей, термопары и устройства для контроля азотирования; 4) очистка поверхности детали катодным распылением в течение 15–40 минут под напряжением 800–1000 В при давлении около 133 Па. Катодное распыление обрабатываемой поверхности обеспечивает нагрев деталей до 300–400 °С. Выход на заданную температуру азотирования и выдержка для получения нужной толщины азотированного слоя обеспечиваются параметрами и режимом ВТАППТР, представленными в таблицах 1 и 2. Давление в период насыщения азотом поддерживается в интервале 400–650 Па, рабочее напряжение – 350–550 В; 5) охлаждение деталей в камере печи до 150–200 °С при давлении 13,0–65 Па продолжается 1,0–2,0 ч.

При экспериментальных исследованиях использовали образцы из стали 40Х13 размером 30х30 мм и толщиной 10 мм. Газовый режим азотирования (таблица 2) обеспечивает равномерное упрочнение поверхностей образцов (равномерную толщину диффузионного слоя).

Таблица 1. – Основные параметры процесса ВТАППТР деталей из различных сталей

Марка стали	Температура, °С,	Газовый режим	Выдержка, ч, для получения слоя толщиной, мм					Твердость на поверхности, НВ
			0,15–0,2	0,2–0,25	0,25–0,3	0,3–0,35	0,35–0,4	
40Х	520	1,2	4–5	7–9	9–12	12–15	15–18	500–550
40ХФА	520	1	4–5	6–8	9–12	15–18	–	–
	520	2	4–5	6–8	8–10	12–15	15–18	510–560
18ХГТ	530	1,2	4–5	6–8	9–12	15–18	–	620–680
	550	1,2	3–4	4–5	6–8	9–12	15–18	530–600
30Х3МФ	530	1	4–5	6–8	9–12	15–18	–	700–760
	530	2	4–5	5–7	6–8	9–12	15–18	–
38Х2МЮА	550	1,2	4–5	5–7	7–9	9–12	15–18	900–950

Таблица 2. – Газовый режим процесса ВТАППТР деталей из различных сталей

№ эксперимента	Время диффузионного насыщения, мин	Давление реакционного газа, Па	Состав реакционного газа	Температура газа, К	Эксплуатационная температура, К	Микротвердость поверхностного слоя, МПа	Толщина диффузионного слоя, мкм
1	180	125	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5%Аг	773	788	3700	288
2	150	200	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	873	725,5	10062	125
3	210	75	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15%Аг	673	850,5	9955	286
4	150	175	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15%Аг	873	819,2	8175	215
5	210	50	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5%Аг	773	694,3	10590	142
6	180	100	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5%Аг	673	881,8	8270	253
7	240	225	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	773	756,8	8985	208
8	90	250	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15%Аг	673	709,9	9100	267
9	180	125	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	873	834,9	8945	181
10	150	50	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15% Аг	773	772,4	10235	179
11	210	175	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5% Аг	673	897,3	8144	312
12	150	100	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	873	803,6	8335	228
13	210	225	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15% Аг	673	678,6	10835	267
14	180	150	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	773	866	8841	215
15	240	25	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5% Аг	873	741	9150	191
16	90	150	90% N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5% Аг	673	780	8659	212

Технологические параметры формирования упрочненных слоев: температура термоциклирования –  $550 \pm 30$  °С, давление – 25–150 Па, время обработки – 10,00 ч, соотношение реакционных газов – 80% Ar + 20% N<sub>2</sub>.

С помощью предлагаемой технологии возможна обработка различных деталей. Например, коленчатые валы, гильзы двигателей внутреннего сгорания, шестерни различных модулей, шнеки экструдеров, валы, штампы, пресс-формы, длинномерные детали с отверстиями и др. Ионное азотирование используют для обработки чугунов и различных сталей и сплавов: конструкционных и инструментальных, мартенситостареющих, коррозионностойких, хромистых и хромоникелевых сталей ферритного и аустенитного класса и т.п. Перспективна новая технология для упрочнения алюминия, титана, тугоплавких металлов – ниобия, молибдена.

Анализ последних исследований и публикаций [1–4] показывает отсутствие обобщающих выводов и рекомендаций по выбору оптимальных параметров ВТАППТР, которые использовались для практического применения этой технологии. Эти обстоятельства подтверждают актуальность оптимизации технологии ВТАППТР и необходимость дальнейшего ее изучения.

*Построение математической модели процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда.* Разработка технологического процесса (ТП) связана с решением задач по оптимизации. Это объясняется тем, что значительное количество технологических параметров в сочетании с широкой номенклатурой материалов, из которых формируют упрочненный поверхностный слой (УПС), дают технологам широкий ряд альтернативных вариантов. В такой ситуации эффективность принятых решений будет зависеть от наличия необходимых критериев оценки работоспособности конструктивного материала из УПС в заданных условиях эксплуатации.

В теории планирования эксперимента к критериям оптимизации предъявляются требования, выполнение которых необходимо для успешного решения задачи [5–7]: 1) иметь физический смысл и характеризовать исследуемый процесс; 2) быть воспроизводимыми, т.е. при повторении опытов в номинально одинаковых условиях полученные значения должны совпадать с точностью до ошибки эксперимента; 3) каждому значению независимых переменных должно соответствовать одно значение отклика; 4) иметь измеряемые значения при любой комбинации выбранных уровней факторов; 5) иметь значение и задаваться одним числом, а также допускать смену при любой возможной комбинации выбранных уровней варьирования.

С помощью использования ТП ВТАППТР, который влияет на качество поверхностного слоя, можно управлять значениями параметров конструктивной прочности материалов. Понятие конструктивной прочности включает ряд параметров или показателей, характеризующих не только прочность конструктивных элементов, но и их долговечность (ресурс), несущую способность, а главное надежность. К показателям конструкционной прочности элементов можно отнести прочность при различных видах нагрузки (растяжение, изгиб, контактные нагрузки и др.), при линейном, двух- и трехосных напряженном состоянии с разным характером приложения нагрузки (импульсным, длительным, стационарным или переменным), в т.ч. программным, при низких и высоких температурах, в условиях воздействия окружающей среды [7–10].

Оценивая условия работы наиболее нагруженных конструктивных элементов, установлено одновременное воздействие динамических нагрузок, повышенных температур и коррозионной среды.

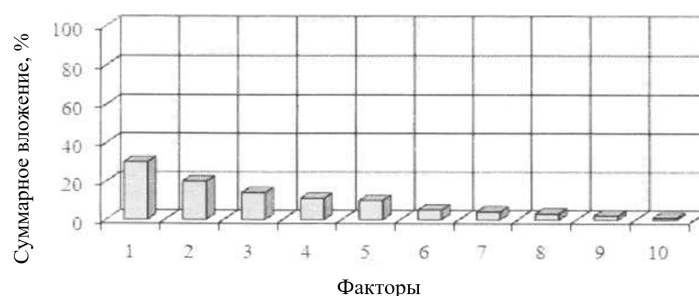
Среди динамических нагрузок особый интерес представляют циклические нагрузки. При систематическом повторении погрузки и разгрузки происходит накопление дефектов структуры материала, что приводит к возникновению микроскопических трещин, сочетание которых вызывает разрушение от усталости. Установить максимальную циклическую нагрузку, при которой материал не разрушается, можно с помощью термомеханических высокочастотных испытаний на усталость, т.е. определить значения предела выносливости укрепленного конструктивного материала. Коррозионное повреждение существенно снижает механические свойства конструкционного материала. Таким образом, в качестве критериев оптимизации технологического процесса ВТАППТР выбраны предел выносливости и коррозионная стойкость, характеризующаяся удельным увеличением массы (таблица 3).

Таблица 3. – Критерии оптимизации

Название критерия оптимизации	Цель	Обозначения	Ограничения
Граница выносливости	максимум	$Y_1$	–
Удельное увеличение массы	минимум	$Y_2$	–

При определении управляемых факторов были рассмотрены все существующие группы факторов, которые могут оказывать влияние на ТП. При выборе факторов учитывалась область, ограничивающая их возможное варьирование, а также размерность. Для каждого  $i$ -го фактора устанавливались следующие значения:  $x_{i0}$  – основной уровень фактора;  $X_{i\max}$ ,  $X_{i\min}$  – верхний и нижний уровни  $i$ -го фактора, применяемые при исследовании;  $A_x$  – интервал варьирования. Факторы должны отвечать следующим требованиям: быть управляемыми; не зависеть от других переменных; соответствовать требованиям совместимости; интервал изменения каждого фактора не должен быть достаточно малым и широким; быть однозначны (одному значению независимой переменной соответствует одно значение отклика); выбор факторов должен быть полным; точность фиксации факторов должна быть высокой.

При выборе управляемых факторов для изучения процесса ВТАПШТР были рассмотрены все существующие группы факторов, которые могут оказывать влияние на ТП. После экспертной оценки [11; 12] и серии отсеивающих экспериментов был получен средний априорный ранжированный ряд факторов, влияющих на ТП ВТАПШТР (рисунок 2).



1 – температура насыщения; 2 – давление реакционного газа; 3 – состав реакционного газа; 4 – время ионной обработки; 5 – эксплуатационная температура; 6 – толщина УПС; 7 – материал детали; 8 – частота колебания; 9 – рабочий ток процесса насыщения; 10 – рабочее напряжение процесса насыщения

Рисунок 2. – Ранжированный ряд конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов

Для моделирования процесса ВТАПШТР на основе анализа проведенного ранжирования была определена группа факторов, влияющая на величину критериев оптимизации. В матрицу планирования были выбраны управляемые факторы: время диффузионного насыщения, давление и состав реакционного газа, температура диффузионного насыщения и эксплуатационная температура (таблица 4).

Таблица 4. – Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Обозначения	Уровни варьирования
Время диффузионного насыщения, мин	$X_1$	90–240 (шаг 30)
Давление реакционного газа, Па	$X_2$	25–250 (шаг 25)
Состав реакционного газа	$X_3$	1) 90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5% Ar; 2) 95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> ; 3) 80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15% Ar
Температура газа, К	$X_4$	673–873 (шаг 100)
Эксплуатационная температура, К	$X_5$	663–913

Значения факторов  $X_2$  и  $X_4$ , приведенные в таблице, в течение процесса ВТАПШТР непостоянны: давление реакционного газа периодически (с периодом 15–30 мин) снижается до нуля, а температура процесса колеблется в пределах 25–35 °С.

*Исследование свойств ионноазотированных слоев.* При исследовании микротвердости поверхностных слоев после ВТАПШТР обнаружен рост ее значений до 10 835 МПа (таблица 5) и уменьшение до 3700 МПа. Согласно таблице 5 проведение азотирования в пульсирующем тлеющем разряде способствует увеличению микротвердости и глубины упрочнения обработанных поверхностных слоев. В любом случае такие значения микротвердости образцов в 2,5–3,0 раза больше, чем без влияния пульсирующего тлеющего разряда, и в 1,5 раза больше, чем у образцов после газового азотирования (90% N<sub>2</sub> + 10% Ar;  $T = 600$  °С, время азотирования  $\tau = 4,0$  ч). Анализ данных позволяет сделать вывод о существовании некоторых диапазонов температуры азотирования  $T$  (°С) и давления реакционного газа  $P$  (Па), при которых микротвердость поверхностных слоев достигает своих максимальных значений: для температуры азотирования  $T$  °С этот диапазон находится в пределах 550–600°С, для давления газа  $P$  (Па) –

в пределах 200–230 Па. С увеличением времени диффузионного насыщения микротвердость поверхностного слоя уменьшается, более интенсивно – после 2 ч обработки. Что касается влияния на микротвердость состава реакционного газа, то установлено, что максимальные значения она приобретает при использовании смеси 90% N<sub>2</sub> + 5% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + 5% Ar, минимальные – при смеси 80% N<sub>2</sub> + 5% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + 15% Ar.

Качество поверхностного слоя определяется шероховатостью поверхности (таблица 6). При исследовании качества поверхности упрочненных образцов обнаружено незначительное ее ухудшение с Ra = 0,25 мкм в неазотированных образцах до Ra = 0,29–0,39 мкм в азотированных. Режимы обработки ВТАППТР для данных таблицы 5 и 6 представлены в таблице 2.

Таблица 5. – Микротвердость упрочненных поверхностных слоев образцов после ВТАППТР

№ режима обработки	Микротвердость поверхностного слоя, МПа	
	без пульсирующего тлеющего разряда	с пульсирующим тлеющим разрядом
0	3100	3700
1	9032	10062
2	8164	9955
3	7414	8175
4	8614	10590
5	8047	8270
6	8089	8985
7	8154	9100
8	7534	8945
9	9111	10235
10	9904	8144
11	7040	8335
12	9898	10835
13	7950	8841
14	8061	9150
15	7769	8659
16	7179	8663

Таблица 6. – Шероховатость поверхности ЗПШ образцов после ВТАППТР

№ режима обработки	Ra, мкм, образцов после вакуумного азотирования	Образцы после термоциклического азотирования Ra, мкм, ВТАППТР
0	0,248	0,218
1	0,324	0,291
2	0,385	0,364
3	0,335	0,353
4	0,310	0,312
5	0,284	0,347
6	0,330	0,326
7	0,275	0,242
8	0,294	0,385
9	0,286	0,381
10	0,315	0,294
11	0,304	0,236
12	0,294	0,308
13	0,328	0,315
14	0,302	0,319
15	0,299	0,290
16	0,330	0,361

Путем технологии ВТАППТР можно получить антикоррозионную способность, такую как и при использовании гальванических покрытий. В результате проведения исследований антикоррозионной способности ионноазотированных стальных образцов выявлено повышение коррозионной стойкости в 1,7–3,1 раза (таблица 7).

Таблица 7. – Результаты исследования коррозионной стойкости азотированных образцов

№ режима обработки	Удельное увеличение массы образца $\Delta m/m$ после 10 ч испытаний	
	без пульсирующего тлеющего разряда	с пульсирующим тлеющим разрядом
0	0,58	0,40
1	0,17	0,12
2	0,22	0,18
3	0,19	0,17
4	0,17	0,15
5	0,20	0,18
6	0,20	0,19
7	0,21	0,18
8	0,19	0,16
9	0,16	0,14
10	0,18	0,18
11	0,21	0,20
12	0,16	0,14
13	0,19	0,16
14	0,18	0,15
15	0,20	0,20
16	0,21	0,18

Для определения сопротивления усталости при упрочнении ВТАППТР исследовали не менее 10–15 образцов. Каждый образец доводили до разрушения, при этом амплитуду колебания образца и частоту нагрузки в течение всего времени исследования почти до его разрушения поддерживали постоянной. База испытаний на усталость  $N = 10^7$  циклов нагрузки. При исследовании на усталость в условиях повышенных температур образец перед нагрузкой (т.е. до начала испытаний) нагревали до заданной температуры и выдерживали в камере нагрева дополнительно в течение 30 мин. Момент начала разрушения образца устанавливали с падением резонансной частоты его колебаний на 10–15 Гц.

На количественные характеристики усталости оказывает влияние температура окружающей среды. С повышением температуры испытания с 500 °С предел выносливости уменьшается. Активизируются диффузные процессы на поверхности образца под неаддитивным воздействием температуры и внешней среды, что приводит к появлению микроскопических поверхностных трещин, которые являются началом разрушения от усталости. На сопротивление усталости оказывают влияние число циклов нагружения и время нахождения образца при высоких температурах в условиях циклического нагружения. ВТАППТР ограничивает скорость прохождения диффузных процессов, что значительно влияет на повышение предела выносливости. Благодаря ТП ВТАППТР удалось повысить предел выносливости образцов на 15–20% с увеличением количества циклов до разрушения при одновременном действии циклических нагрузок и температуры.

*Построение математических моделей ВТАППТР по результатам эксперимента.* По результатам эксперимента проведен статистический анализ и построены регрессионные модели зависимости критерия оптимизации, характеризующие предел выносливости упрочненных образцов от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Расчет модели осуществлялся с помощью ППП ПРИАМ [11; 12]. Исходные данные представлены в таблицах 1, 2, результаты экспериментальных исследований – в таблицах 5–8. После обработки результатов эксперимента получена математическая модель, описывающая зависимость предела выносливости  $Y_1$  и удельное увеличение массы  $Y_2$  от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов:

$$Y_1 = 675,186 - 109,067x_5 + 30,5017x_2^2x_5 - 18,519x_2 + 33,5729x_1x_4^2 - 21,2256x_4^2, \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,506646 - 0,236804x_4x_5^2 - 0,171444x_2x_5 - 0,166716x_1x_2^2 - 0,0272092x_1^2 - 0,195253x_2^2x_5^2, \quad (2)$$

где  $Y_1 Y_2$  – математические модели пределы выносливости  $Y_1$  и удельного увеличения массы  $Y_2$  в кодированных значениях для  $\sigma_{-1}$  и  $\Delta m/m$ .

Формулы перехода от кодированных значений к натуральным:

$$\begin{aligned} x_1 &= 1(X_1 - 1); & x_1^2 &= 1,6(X_1^2 - 0,625); \\ x_2 &= 0,249805(X_2 - 5,99688); & x_2^2 &= 1,60639(X_2^2 - 0,000330781X_2 - 0,377154); \\ x_4 &= 8,97817(X_4 - 0,368619); & x_4^2 &= 1,83884(X_4^2 - 0,0877399X_4 - 0,368613); \\ x_5 &= 0,0079028(X_5 - 786,463); & x_5^2 &= 1,61702(X_5^2 - 0,0366532X_5 - 0,36933), \end{aligned}$$

где  $X_1, X_2, X_4, X_5$  – конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы (см. таблицу 4).

Таблица 8. – Результаты экспериментальных исследований

	Граница выносливости, $\sigma_{-1}$ , МПа		Удельное увеличение массы образца, $\Delta m/m$	
	$Y_{1.1}$	$Y_{1.2}$	$Y_{2.1}$	$Y_{2.2}$
1	720	781	0,12	0,19
2	770	698	0,18	0,23
3	620	685	0,17	0,24
4	630	672	0,15	0,13
5	830	787	0,18	0,15
6	500	591	0,19	0,21
7	680	603	0,18	0,18
8	740	718	0,16	0,21
9	570	645	0,14	0,19
10	720	639	0,18	0,16
11	500	583	0,20	0,21
12	650	702	0,14	0,16
13	810	749	0,16	0,14
14	560	638	0,15	0,17
15	745	695	0,20	0,16
16	630	706	0,18	0,21

Полученные зависимости (1) и (2) проверены на адекватность, воспроизводимость и информативность результатов по критериям математической статистики. Результаты статистического анализа представлены в таблице 9. Результаты повторных исследований, проведенных в одинаковых условиях, проверялись на статистическую воспроизводимость по  $G$  – критерию Кохрена. Для всех регрессионных зависимостей  $G_{расч} < G_{табл}$  при  $\alpha = 0,05$ . Поэтому степень рассеивания результатов по строкам матрицы планирования одинакова, а результаты воспроизведены.

Проверка гипотезы на адекватность полученных моделей результатов эксперимента проводилась с использованием  $F$  – критерия Фишера. Для получения моделей при принятом уровне значимости  $\alpha = 0,05$   $F_{расч} < F_{табл}$ , поэтому модель адекватно отражает результат эксперимента.

Оценка качества полученных математических моделей проводилась путем определения коэффициента множественной корреляции. Коэффициент множественной корреляции  $K$  показывает величину статистической связи по уравнению множественной регрессии  $V_i$  и начальным экспериментальным результатам. В полученных математических моделях коэффициенты множественной корреляции статистически значимы, т.е.  $F_{расч} > F_{табл}$  при принятом уровне значимости. Итак, модели информативны и несут полезную информацию о процессе моделируемой системы.

Результаты статистического анализа (таблица 9) позволяют сделать вывод, что регрессионные зависимости адекватны и информативны, результаты воспроизведены, коэффициенты статистически значимы. Все это говорит о том, что регрессионные зависимости адекватно описывают процесс и их можно использовать для анализа и оптимизации ТП ВТАПШТР [11; 12].

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что основным механизмом повышения предела выносливости материалов вследствие диффузионного насыщения поверхности азотом в пульсирующем тлеющем разряде в термоциклическом режиме является упрочнение поверхностных слоев.



Таблица 9. – Результаты статистического анализа

Параметры статистического анализа	Значения параметров для моделей	
	$\sigma_1$	$\Delta/m$
Остаточная дисперсия	879,001	0,00309292
Дисперсия воспроизводимости	2228,03	0,00155937
Расчетное значение $F$ -критерия	2,53473	1,98344
Уровень значимости $F$ -критерии: для адекватности для степеней свободы	0,05 $V_1 = 5$ $V_2 = 10$	0,05 $V_1 = 10$ $V_2 = 16$
Табличное значение $F$ -критерия для адекватности	2,82757	2,49351
Стандартная ошибка оценки	29,6879	0,0592546
Стандартная ошибка оценки, скорректированная с учетом степеней свободы	34,668	0,0691945
Судьба рассеяния, которая объясняет модель	0,902121	0,859807
Введено регрессоров	6	6
Коэффициент множественной корреляции	0,949801	0,927258
Коэффициент множественной корреляции, скорректированный с учетом степеней свободы	0,930875	0,899348
$F$ отношение для $R$	18,4334	12,266
Уровень значимости критериев: для информативности для степеней свободы	0,05 $V_1 = 50$ $V_2 = 26$	0,05 $V_1 = 50$ $V_2 = 26$
Табличное значение $F$ -критерии для информативности	2,58679	2,58679
Критерии Бокса и Веца для информативности	1	1

Упрочнение поверхностных слоев происходит по следующим механизмам: образование структур с упрочняющими фазами (нитридов, карбонитридов и т.д.); упрочнение за счет образования твердых растворов, которые создают энергетический барьер и затрудняют перемещение дислокаций; уменьшение размеров зерен, что приводит к увеличению площади межзеренных границ и препятствует движению дислокаций. При диффузии азота в поверхностные слои большое значение приобретают остаточные напряжения сжатия, возникающие в случае диффузионного насыщения поверхности азотом. Внедренный в матрицу атом азота раздвигает соседние атомы, создавая остаточные напряжения сжатия. Эти напряжения эффективно сохраняют поверхность от разрушения.

Ионноазотирующая обработка значительно влияет на химические и адгезионные свойства поверхности упрочненных материалов. Образование химических соединений в сталях и сплавах за счет внедрения азота или повышения пределов его концентрации меняет скорость химических реакций и кинетику роста оксидных пленок, повышает их сцепление с основанием. Это приводит к уменьшению интенсивности образования адгезионных узлов схватывания и способствует улучшению механических свойств.

**Заключение.** Анализ проведенных исследований показывает отсутствие обобщающих выводов и рекомендаций по выбору оптимальных технологических параметров ВТАППТР, которые использовались бы для практического применения этой технологии. Эти обстоятельства подтверждают актуальность оптимизации технологии ВТАППТР и необходимость дальнейшего изучения. Математические модели процесса ВТАППТР построены методом случайного поиска на основе равномерно распределенных случайных точек, пакета прикладных программ «Планирование, регрессия и анализ моделей», теории планирования эксперимента и математической статистики.

После экспертной оценки и серии отсеивающих экспериментов определены критерии оптимизации (предел выносливости и коррозионная стойкость) и управляемые факторы для математического моделирования формирования упрочненных ионноазотированных поверхностных слоев. Полученные математические модели описывают зависимости предела выносливости и коррозионной стойкости от параметров процесса ВТАППТР. Их можно использовать для оптимизации ТП ВТАППТР.

В результате проведенных исследований установлены закономерности влияния параметров ТП ВТАППТР на микротвердость, глубину диффузионного насыщения, величину и распределение остаточных напряжений в упрочненных слоях стальных поверхностей. Показано, что:

– для получения максимальной микротвердости поверхностного слоя достигает 7600 МПа, давление реакционного газа должен находиться в пределах 200–250 Па, время диффузионного насыщения – 90–150 мин; температура процесса – 500–600 °С;

– для получения максимальной толщины диффузионного слоя 150–305 мкм давление реакционного газа должен находиться в пределах 200–250 Па, время диффузионного насыщения – 180–240 мин; температура процесса – 550–600 °С;

– в ионноазотированных слоях возникают остаточные напряжения сжатия порядка 445–950 МПа, уровень и распределение которых зависят от технологических параметров процесса ВТАПТТР и от предварительной термообработки.

Согласно исследованиям свойств поверхностных слоев образцов, упрочненных азотированием, установлено, что благодаря использованию ВТАПТТР коррозионная стойкость повышается в 3,1 раза, предел выносливости стальных конструкций при температурах до 640 °С – на 15–20%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Термоциклическое азотирование как синтез разработок НАН Украины / В.В. Харченко [и др.] // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : материалы 12-го Междунар. науч.-техн. семинара, Свалява, 20–24 февр. 2012 г. / Ассоц. технологов-машиностроителей Украины [и др.]. – Киев : АТМ Украины, 2012. – С. 287–290.
2. Ляшенко, Б.А. О достоинствах технологии вакуумного азотирования / Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский // Оборудование и инструмент. – 2005. – № 12. – С. 20–21.
3. Ляшенко, Б.А. Повышение прочности и износостойкости металлических изделий с помощью импульсной методики нанесения ионно-плазменных нитридных покрытий / Б.А. Ляшенко, А.О. Хоцяновский, А.Ю. Кумуржи // Проблемы прочности. – 2014. – № 3. – С. 155–163.
4. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді : пат. України 19782 : МПК С23С 8/06 / А.В. Рутковский, Б.А. Ляшенко ; дата публ.: 15.12.2006.
5. Дубровська, Г.М. Системи сучасних технологій / Г.М. Дубровська, А.П. Ткаченко ; за ред. А.П. Ткаченка. – Черкаси : ЧДТУ, 2001. – 195 с.
6. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова. – М. : Наука, 1971. – 283 с.
7. Скляр, Н.М. Конструктивная прочность металлов / Н.М. Скляр // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1981. – № 6. – С. 8–12.
8. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению / Г.С. Писаренко. – Киев : Наукова думка, 1994. – Ч. 1. – 286 с.
9. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов / Г.С. Писаренко. – Киев : Вища школа, 1986. – 775 с.
10. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
11. Радченко, С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем / С.Г. Радченко. – Київ : Політехніка, 2001. – 88 с.
12. Лапач, С.Н. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич // Программные продукты Украины : каталог. – Киев : Текпор, 1993. – С. 24–27.

Поступила 08.07.2020

#### INCREASING THE STRENGTH PROPERTIES OF SURFACES OF STEEL PARTS VACUUM THERMOCYCLIC NITROGENIZATION IN PLASMA OF PULSATING GREAT DISCHARGE

**A. DUDAN, A. RUTKOVSKY, M. AHIEIEV, V. MIRNENKO, T. SMYRNOVA, O. RADKO**

*As a result of the studies, the regularities of the influence of the VTAPIITR TP parameters on the microhardness, the diffusion saturation depth, the magnitude and distribution of residual stresses in the hardened layers of steel surfaces are established. Based on the use of expert assessment methods and the results of a series of screening experiments, optimization criteria (endurance limit and corrosion resistance) and controlled factors for mathematical modeling of the formation of reinforced ion-nitrated surface layers are determined. A mathematical model of the TP of the formation of reinforced surfaces of the VTAPPTR TP according to the criteria of endurance and corrosion resistance is obtained. An analysis of the studies showed that there are no general conclusions and recommendations on the selection of the optimal technological parameters of the VTAPTR that would be used for the practical application of this technology. These circumstances confirm the need for further study of the VTAPTR technology and the expediency of its optimization.*

**Keywords:** vacuum thermocyclic nitriding, mathematical model, technological process, plasma, pulsating glow discharge.