

621.791.7  
Т 98

# ПЛАЗМЕННЫЕ УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ



Ю.Н. ТЮРИН  
М.А. ЖАДКЕВИЧ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ  
им. Е. О. ПАТОНА

Ю. Н. Тюрин, М. Л. Жадкевич

**П Л А З М Е Н Н Ы Е  
У П Р О Ч Н Я Ю Щ И Е  
Т Е Х Н О Л О Г И И**

---

*ПРОЕКТ  
«НАУКОВА КНИГА»*

---

КИЕВ  
НАУКОВА ДУМКА  
2008

УДК 791.947.2:621.375.826

В монографии представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований нестационарных процессов формирования высокоэнергетических плазменных струй и созданных на их базе комплексных упрочняющих технологий. Технологии позволяют легировать и структурировать только рабочие поверхности изделий, что многократно повышает их физико-механические свойства без изменения структурного состояния всего изделия. Показано, что комплекс разработанных технологий многократно повышает коррозионную стойкость, прочность, износостойкость, усталостную прочность изделий при циклических нагрузках и т. д. Наряду с теоретическим материалом широко представлена информация по применению и эффективности использования разработанных технологий в промышленности.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий и институтов, которые специализируются в области упрочняющей обработки изделий.

У монографії наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень нестационарних процесів формування високоенергетичних плазмових струменів і створених на їх основі комплексних зміцнювальних технологій. Технології дають змогу легувати та структуривати лише робочі поверхні виробів, що у багато разів підвищує їхні фізико-механічні властивості, не змінюючи структурного стану усього виробу. Показано, що комплекс розроблених технологій значно підвищує корозійну стійкість, міцність, зносостійкість, утомну міцність виробів за циклічних навантажень тощо.

Крім теоретичного матеріалу викладено інформацію із застосування та ефективності використання розроблених технологій у промисловості.

Для інженерно-технічних працівників машинобудівних підприємств та інститутів, що спеціалізуються у галузі зміцнювальної обробки виробів.

***Видання здійснене за державним контрактом на випуск наукової друкованої продукції.***

Научно-издательский отдел физико-математической  
и технической литературы

Редактор *В. В. Вероцкая*

ISBN 978-966-00-0935-6

© Ю. Н. Тюрин, М. Л. Жадкевич, 2008

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

---

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1. ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИХ ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ</b> .....	11
1.1. Технологии на основе концентрированных источников энергии .....	11
1.1.1. Лазерные технологии .....	11
1.1.2. Плазменные технологии .....	12
1.1.3. Электронно-лучевые технологии .....	12
1.1.4. Ионная имплантация .....	13
1.1.5. Ударно-волновая обработка.....	13
1.2. Особенности и преимущества применения высокоэнергетических технологий .....	13
1.2.1. Термическое упрочнение .....	13
1.2.2. Легирование поверхности .....	15
1.2.3. Упрочнение инструментальных сплавов .....	16
1.2.4. Упрочнение твердых сплавов .....	17
1.3. Технологии модифицирования .....	19
1.3.1. Характерные свойства легирующих элементов .....	19
1.3.2. Модифицирование быстрорежущих сплавов .....	20
1.3.3. Ускорение диффузии легирующих элементов .....	21
1.3.4. Азотирование .....	22
1.4. Комплексная импульсно-плазменная технология.....	23
<b>ГЛАВА 2. ТЕОРИЯ ПЛАЗМЕННО-ДЕТОНАЦИОННОГО ГЕНЕРИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ</b> .....	25
2.1. Взаимодействие плазмы с поверхностью твердого тела .....	25
2.1.1. Сущность лазерного упрочнения .....	25
2.1.2. Торможение плазменной струи на твердой поверхности .....	25
2.1.3. Тепломассообмен .....	28
2.1.4. Определение тепловых потоков .....	29
2.2. Физико-математическая модель плазменно-детонационного формирования плазмы .....	30
2.2.1. Постановка задачи .....	30
2.2.2. Анализ результатов решения .....	38
<b>ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ</b> .....	41
3.1. Конструктивные особенности плазменно-детонационных генераторов .....	41
3.2. Методика исследования импульсной плазмы .....	44

3.3. Формирование плазменной струи, ее взаимодействие с преградой .....	45
3.4. Исследование импульсной плазмы .....	49
3.4.1. Энергетические характеристики импульсной плазмы .....	49
3.4.2. Спектроскопические исследования .....	55
<b>ГЛАВА 4. ПЛАЗМЕННО-ДЕТОНАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ .....</b>	<b>58</b>
4.1. Генераторы импульсной плазмы .....	58
4.2. Технологические установки для упрочнения изделий и нанесения покрытий .....	60
<b>ГЛАВА 5. ПДО СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА .....</b>	<b>64</b>
5.1. Сплавы с содержанием углерода 0,7-0,8 % .....	64
5.1.1. Методика исследования .....	64
5.1.2. Эффективность воздействия физических полей .....	64
5.1.3. Особенности ПДО .....	65
5.1.4. Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы сплава .....	68
5.1.5. Металлографические и Оже-спектроскопические исследования .....	71
5.2. Модифицирование поверхности среднеуглеродистых сплавов .....	73
5.3. Модифицирование поверхности быстрорежущих сталей .....	78
5.3.1. Обработка в атмосфере воздуха .....	78
5.3.2. Обработка в среде азота .....	83
5.4. Механизм упрочнения плазменной обработкой .....	85
5.5. Анализ результатов исследования плазменной обработкой .....	88
<b>ГЛАВА 6. ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ .....</b>	<b>91</b>
6.1. Массоперенос при импульсной обработке металлов .....	91
6.2. Взаимодействие импульсной плазменной струи при ПДО с твердой поверхностью .....	94
6.2.1. Моделирование процессов в УСС .....	94
6.2.2. Поверхность изделия — катод .....	98
6.2.3. Поверхность изделия — анод .....	100
6.2.4. Поверхность изделия изолирована .....	100
6.3. Теплофизические характеристики поверхности .....	101
6.3.1. Моделирование теплопроводности .....	101
6.3.2. Температурное поле поверхностных слоев при ПДО .....	102
6.4. Легирование углеродистых сталей .....	105
6.4.1. Сталь 9ХС .....	105
6.4.2. ПДО $\alpha$ -Fe .....	107
6.4.3. Среднеуглеродистая сталь .....	108
<b>ГЛАВА 7. ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ С РАСПЛАВЛЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ .....</b>	<b>112</b>
7.1. Технология и методика исследования .....	112
7.2. Модифицирование оплавленной поверхности .....	114
7.2.1. Взаимодействие импульсов плазмы с поверхностью .....	114
7.2.2. Интенсификация кристаллизации расплавленного слоя .....	117
7.3. Модифицирование поверхности металлами .....	118
7.3.1. Методика исследования .....	118
7.3.2. Медь и алюминий .....	119
7.3.3. Титан и вольфрам .....	120
7.4. Железографитовые сплавы .....	122

7.5.	Легирование поверхности элементами из обмазок .....	124
7.5.1.	Лазерное легирование .....	124
7.5.2.	Легирование поверхности элементами из обмазок .....	126
<b>ГЛАВА 8.</b>	<b>УПРОЧНЕНИЕ ЧУГУНОВ .....</b>	<b>128</b>
8.1.	Плазменная обработка высокопрочного чугуна .....	128
8.2.	Плазменно-детонационное упрочнение чугуна.....	131
<b>ГЛАВА 9.</b>	<b>ДУПЛЕКСНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ .....</b>	<b>135</b>
9.1.	Оптимизация рельефа поверхности .....	135
9.2.	Упрочнение рельефа поверхности ПДО .....	139
9.3.	Двойные и тройные технологии модифицирования .....	140
9.4.	Алмазоподобные покрытия .....	143
9.4.1.	Эффективность углеродных технологий .....	143
9.4.2.	Технологии формирования алмазных и углеродных пленок .....	143
9.4.3.	ПДО осаждение углеродных пленок .....	145
<b>ГЛАВА 10.</b>	<b>МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ...</b>	<b>151</b>
10.1.	Импульсно-плазменное упрочнение .....	151
10.2.	Плазменное упрочнение твердых сплавов .....	152
<b>ГЛАВА 11.</b>	<b>МОДИФИЦИРОВАНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА .....</b>	<b>157</b>
11.1.	Сплав ВТ22 .....	157
11.2.	Модифицирование сплава ВТ6 азотом .....	160
11.3.	Рентгеноструктурный анализ модифицированных сплавов .....	162
11.4.	Образование рельефа поверхности .....	165
11.5.	Лазерное упрочнение сплавов на основе титана .....	166
11.6.	Микротвердость сплавов после ПДО .....	167
<b>ГЛАВА 12.</b>	<b>ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА.....</b>	<b>170</b>
12.1.	Электрические процессы в нагревателе .....	170
12.2.	Исследование плазменного слоя .....	173
12.3.	Нагрев и охлаждение поверхности .....	175
12.4.	Термоциклическая закалка .....	178
12.5.	Качественные характеристики упрочненного слоя .....	181
12.6.	Область применения ТЦО .....	184
<b>ГЛАВА 13.</b>	<b>МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ .....</b>	<b>187</b>
13.1.	Импульсно-плазменная обработка инструмента .....	187
13.1.1.	Упрочнение металлорежущего инструмента .....	187
13.1.2.	ПДО матриц и пуансонов вырубных штампов .....	189
13.1.3.	ПДО ножей, пил и фрез для обработки древесины .....	194
13.1.4.	ПДО инструмента из твердого сплава .....	195
13.1.5.	Инструмент в перерабатывающей промышленности .....	196
13.2.	ПДО деталей машин .....	197
13.2.1.	Автомобиль .....	197
13.2.2.	Гидропривод и торцевые уплотнения .....	197
13.2.3.	Детали полиграфических машин .....	198
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>199</b>	