

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

Ю.Н.Тюрин¹⁾, М.Л.Жадкевич¹⁾, А.Д.Погребняк²⁾, О.В.Колисниченко¹⁾

¹⁾Институт Электросварки им.Е.О.Патона, НАН Украины, г. Киев, Украина, тел.(044) 2200914, e-mail: ytyurin@i.com.ua

²⁾Сумской институт модификации поверхности, г. Сумы, Украина.

Импульсно-плазменная технология относится к ресурсосберегающим, что обусловлено низким расходом легирующих элементов и электрической энергии в сочетании с высокой производительностью. Технология позволяет обрабатывать (нагревать) только рабочие (режущие) поверхности инструмента, что решает проблемы повышения износостойкости без изменения структурного состояния материала всего изделия. Промышленное внедрение импульсно-плазменной технологии подтверждает ее эффективность. Работоспособность инструмента после упрочнения повысилась в 2...4 раза.

Введение

В процессе воздействия концентрированными источниками энергии происходит быстрый нагрев (время нагрева $10^{-3} \dots 10^{-6}$ с) поверхностного слоя металла с последующим интенсивным охлаждением его путем отвода тепла, как в объем металла, так и в окружающую среду. Высокая скорость нагрева и охлаждения поверхностного слоя металла ($10^4 \dots 10^8$ К/с) способствуют формированию дисперсной кристаллической структуры, высокой плотности дислокаций [7,8].

Термическое воздействие концентрированными источниками энергии совмещают с процессами легирования. Поверхности изделий легируют посредством оплавления предварительно нанесенных покрытий [9,10] или путем ввода в рабочую среду (плазму) газообразных легирующих добавок: азота, углеводородных газов, цианидов [11-13]. Исследования показывают [4-13], что наиболее эффективно импульсное воздействие на поверхность изделия. Это обусловлено более высокими скоростями нагрева и охлаждения, упруго-пластической деформацией поверхности и, как следствие, интенсификацией практически всех известных механизмов диффузии [7].

Исследования [15] показывают, что при скоростной пластической деформации кристаллических тел скорость миграции атомов в них превышает скорость диффузионного переноса элементов в жидком металле. Аналогично повышает массоперенос и скоростное деформирование в импульсном магнитном поле [16-17].

Наиболее интересно то, что одновременное воздействие на поверхность изделия разными видами импульсной обработки значительно увеличивает массоперенос и это увеличение носит синергетический характер.

В ИЭС им. Е.О.Патона разработана импульсно-плазменная технология обработки материалов, которая позволяет одновременно, в одном импульсе обработки, реализовать различные методы воздействия на поверхность: упруго-пластическое деформирование; воздействие звуком и импульсным магнитным полем; тепловую и электроимпульсную обработку; а также деформирование металлов и сплавов в процессе обратимых ($\alpha \rightarrow \gamma$) превращений.

II. Формирование импульсной плазмы

С целью эффективного формирования мощных плазменных струй использовали нестационарные детонационные режимы горения горючих газовых смесей.

Энергетические параметры продуктов нестационарного детонационного горения (импульсной плазменной струи) определяются решением известной двумерной нестационарной задачи распространения детонационной волны (ДВ) в электрическом поле между двумя коаксиальными электродами. Для осуществления численного решения эта задача

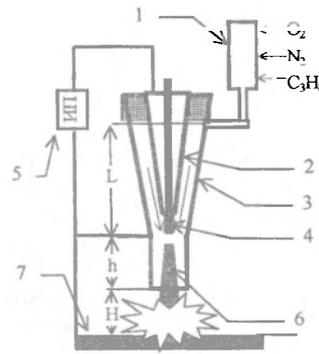


Рис.1.Схема импульсного плазматрона

была упрощена, и средние значения температуры, скорости, давления и плотности продуктов сгорания по оси электродов определялись без учета изменения их по сечению [19, 20].

Результатом решения является программа для расчета камеры сгорания импульсного плазматрона (рис.1.), который состоит из детонационной камеры 1, где осуществляется формирование горючей газовой смеси и инициирование детонационного ее сгорания; центрального электрода-анода 2; конического электрода – катода 3; расходного электрода 4; источника питания 5.

При инициировании детонации ионизированные продукты сгорания поступают из детонационной камеры 1 в межэлектродный зазор и замыкают электрическую цепь. Образуется электропроводный слой продуктов сгорания, который под влиянием газодинамической и электромагнитной сил ускоряется. По оси центрального электрода 2 закреплен металлический расходный стержень 4, конец которого при нагреве испаряется и обеспечивает ввод в плазменную струю легирующих элементов.

При выбросе импульсной плазменной струи 6 из плазматрона, она замыкает электрическую цепь между электродом – анодом и поверхностью

изделия – катодом 7. В результате прохождения по этой струе электрического тока, плазма нагревается за счет Джоулева тепловыделения $Q=\sigma E^2$ Вт/м³.

Рассчитанные по теоретическим формулам [19, 20] энергетические характеристики плазменных струй на выходе из плазматрона имеют линейную зависимость от напряженности электрического поля и длины межэлектродного зазора. При длине межэлектродного зазора $L=200$ мм и напряженности электрического поля 400 кВ/м плазменная струя может иметь температуру 15000 К, а скорость 5 км/с.

Проводилось экспериментальное определение характеристик плазменной струи на промышленном плазматроне с длиной межэлектродного зазора 200 мм. По результатам спектрального анализа плазменной струи определена усредненная по времени существования температура плазменной струи. Температура плазмы определялась по относительной интенсивности линий железа. Интегральные по времени спектры излучения плазмы показывают, что ее температура на выходе из плазматрона составляет 15000—20000 К.

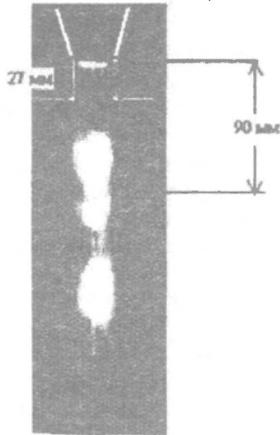


Рис.2 Фоторазвертка плазменной струи

Изучение скоростных фото разверток плазменных струй позволяет заметить в них наличие скачков уплотнения и периодической структуры, рис. 2. Замеры начального диаметра струи (диаметра сопла генератора) и расстояния до первого скачка уплотнения позволяют рассчитать скорость струи. Оценку скорости струи V проводим по формуле [21]:

$$L_w = 1.3d_a \sqrt{M^2 - 1} \quad (1),$$

Перепишем (1) в виде:

$$V = \sqrt{\left(\frac{L_w}{1.3d_a}\right)^2 + 1} \cdot a_0 \quad (2),$$

где $d_a=0.027$ м — диаметр сопла плазматрона; $M=V/a_0$ — число Маха; а $L_w=90$ мм — длины волны периодической структуры, изображение которой получено при помощи скоростной фотосъемки (рис. 2.) Скорость звука a_0 определим по формуле:

$$a_0 = \sqrt{\gamma RT} \quad (3),$$

где в нашем случае: $\gamma=1.3$ —постоянная адиабаты, $R=300$ Дж/(кг К) газовая постоянная, $T=15000$ К—температура струи.

Подставив (3) в (2), получим $V_2=6,7$ км/с, что согласуется с теоретически полученными данными.

Представленная на рис.2 структура плазменной струи характерна для сверхзвукового истече-

ния струй в режиме недорасширения и согласуется с взрывным характером работы плазматрона, при котором возможно значительное превышение давления в камере по сравнению с окружающей средой. Картина взаимодействия плазменной струи с преградой характеризуется наличием плазменной струи и области ударно-сжатого слоя (УСС). [22].

После пробы УСС электрический ток будет течь по плазменной струе от центрального электрода в плазматроне к поверхности обрабатываемого изделия. Плотность электрического тока в плазменной струе составляет $J = (1...7) \cdot 10^3$ А/см², температура $T=15000...30000$ К. Тепловой поток в изделие зависит от плотности электрического тока и изменяется в диапазоне $q=(0.1...5) \cdot 10^6$ Вт/см². Оценку тепловых потоков проводили на основе теоретического анализа нестационарного уравнения теплопроводности по толщине закаленных слоев сталей мартенситного класса [23].

Управление временем воздействия плазменного импульса и его энергетическими характеристиками осуществлялось изменением: емкости C конденсаторов, напряжения $U_{зар}$ на обкладках конденсаторной батареи, индуктивности L в цепи разряда, расстояния до поверхности изделия H и изменением размера активного пятна взаимодействия плазменной струи с поверхностью изделия.

Проводили эксперименты по замеру временного изменения электрического тока в межэлектродном зазоре, а так же тока между центральным электродом и поверхностью изделия. Эксперименты проводили с использованием поясов Роговского по известной методике [23]. Анализ временного распределения токов показывает, что ударно сжатый слой (УСС), который образуется при натекании плазменной струи на поверхность изделия имеет электрическое сопротивление гораздо выше, чем сопротивление разрядного промежутка между коаксиальными электродами. Замеры показали, что пробой УСС происходит только через 1,2 мс. За это время успевает пройти перезарядка конденсаторов и расходуемого электрод 5 (см. рис.1) будет являться катодом в течение 0,2 мс, а затем снова анодом в течение 0,4-0,6 мс.

Экспериментальные работы показали, что поверхность изделия испытывает в первый момент упруго-деформационное взаимодействие с ударной волной и импульсной струей плазмы, затем при пробое УСС поверхность подвергается воздействию электрического тока. Амплитудное значение тока 5 кА. В результате образуется импульсное магнитное поле напряженностью до 2000 Э. В дальнейшем, в течение 3...5 мс, на поверхность натекают продукты сгорания и эрозии электродов.

II. Опыт внедрения технологии

Экспериментальные работы показали, что максимальная микротвердость поверхностного слоя получена при обработке плазмой содержащей пары вольфрама или молибдена, а также при избытке в плазме азота и углерода. Помимо вышеперечисленных технологических парамет-

ров на значение микротвердости влияют так же количество воздействия плазменных импульсов. Увеличение числа импульсов приводит к увеличению толщины упрочненного слоя и его равномерности.

Известно, что высокие эксплуатационные свойства сплавов, применяемых для изготовления инструмента, обеспечиваются за счет легирования их вольфрамом, молибденом и ванадием. Содержание хрома в сплавах составляет 3...4,5%.

Штампы для горячего деформирования деталей машин изготавливают из сплавов, которые содержат 2...6% W (типа 4ХНВ, 4Х5В2ФС); 6...9% W (типа 3Х2В8Ф); и сплавов, которые содержат 12-18% W. Элементом, эффективно улучшающим свойства сплавов, является молибден. Молибден улучшает вязкость, не снижая теплостойкости, повышает разгаростойкость. Молибденовые сплавы (5...6% Mo) очень чувствительны к обезуглероживанию, поэтому при поверхностном легировании сплавов, наравне с использованием расходуемого молибденового электрода, в качестве плазмообразующего газа необходимо использовать смесь с коэффициентом избытка горючего газа.

Импульсно-плазменную обработку изделий из быстрорежущих сплавов Р9М5, Р9М4К8Ф, Р10К5Ф5, Р12Ф5М, Р12Ф2К8М3, необходимо осуществлять без оплавления поверхности. При таком режиме обработки работоспособность инструмента возрастает в 3...5 раз [6,8,9,26]. Так, при ла-

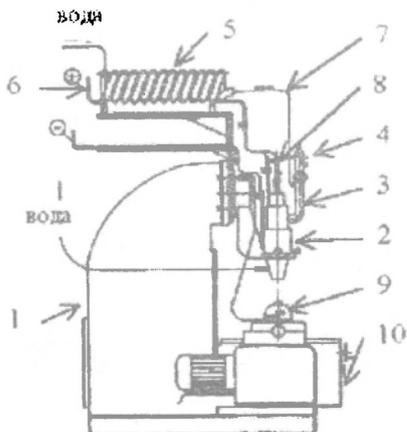


Рис.3 Схема импульсно-плазменной установки, где плазматрон и индуктивность закреплены на фрезерном станке

зерной импульсной обработке [9] повышение твердости поверхности и износостойкости инструмента из быстрорежущей стали происходит только в том случае, когда удельная мощность импульсов находится в пределах $1 < Wp < 5 \times 10^5$ Вт/см², а время воздействия $t = 5 \times 10^{-3}$ с. Эти режимы обработки обеспечивают предельную температуру поверхности, близкую к температуре плавления.

Импульсно-плазменное упрочнение инструмента на ОАО „Череповецкий сталепрокатный завод“ осуществляется на модернизированном фрезерном станке (рис.9). Вместо вертикального шпинделя станка 1 закреплен импульсный плазматрон 2. В плазматрон встроена детонационная пушка 3 с камерой 4 для смешивания газа и иницирования детонации. Электрический ток к

плазматрону поступает через индуктивность 5 по медной шине 6. Охлаждение плазматрона и индуктивности осуществляется водой, которая подходит к плазматрону через индуктивность по трубе 7. Легирующие элементы вводятся по оси плазматрона в виде стержня 8 и через камеру 4 в виде газа. Инструмент закрепляется в приспособлении 9, его перемещение осуществляется приводом станка 10.

Упрочнению подвергались металлорежущий инструмент, а также матрицы и пуансоны штампов холодного и горячего деформирования металла. Перед упрочнением изделия проходили стандартную термическую и механическую обработку. Импульсную плазменную обработку применяли в качестве конечной операции. Упрочнению подвергали только поверхности режущих кромок инструмента, рис 11. Производительность упрочнения составляла до 0,5 м² поверхности час, что при пересчете на реальный инструмент составляет до 100 пуансонов в час. Перед упрочнением поверхность инструмента не требует очистки или какой-либо другой подготовительной операции.

В отличие от металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей, инструмент для штамповки допускает оплавление поверхности [26-27]. Технологические режимы обработки для различного вида пуансонов, матриц, штампов подбирались с минимальной плотностью мощности, до таточной для нагрева поверхности до оплавления. Такой режим обеспечивал легирование расплавленной поверхности изделия элементами составляющими плазменную струю. При упрочнении использовали расходуемый электрод из вольфрама, плазмообразующий газ содержал избыток пропана. Обработка осуществлялась трехкратным воздействием импульсной плазмы на упрочняемую поверхность. Для упрочнения металлорежущего инструмента: метчиков, плшек, протяжек подбирались плотность мощности не достаточная для оплавления и затупления режущих кромок. Использовали расходуемый электрод из молибдена, плазмообразующий газ содержал избыток пропана и азота. Обработку фрез, сверл, резцов и т.д. проводилась с использованием электрода из титана. Обработка осуществлялась с 5...10 - кратным воздействием импульсов плазмы на упрочняемую поверхность.

Технология и технологическое оборудование для импульсно плазменного упрочнения инструмента используют в условиях метизного производства и массового производства металлургической продукции на ОАО „Череповецкий сталепрокатный завод“. Опыт промышленной эксплуатации показал, что работоспособность инструмента повысилась в 2...4 раза.

Заключение

Предлагаемая импульсно-плазменная технология относится к ресурсосберегающим, что обусловлено низким расходом легирующих элементов и электрической энергии в сочетании с высокой производительностью (до 0.5 м²/час). Технология позволяет обрабатывать (нагревать) толстые рабочие (режущие) поверхности инструмента, ч

решает проблемы повышения износостойкости без изменения структурного состояния материала всего изделия.

Обработка поверхности инструмента импульсной плазмой, содержащей легирующие элементы, сопровождается воздействием: деформационным до $P=150$ атм., электромагнитным до $H=2000$ Э, термическим до $Q=5 \cdot 10^6$ Вт/см². Это ускоряет массоперенос элементов из плазмы в глубь упрочняемой поверхности. Промышленное внедрение импульсно-плазменной технологии подтверждает ее эффективность. Работоспособность инструмента после упрочнения повысилась в 2...4 раза.

Список литературы

1. Гурьев В.А., Тескер В.И. Применение лазерной обработки для формирования поверхностного слоя нормализованной стали с высокими триботехническими и вязкими свойствами. // ФХОМ, 1996, №1, с.14-19.
2. Сафонов А.Н. Основные направления эффективного использования лазерной техники для термической обработки сплавов. // МитОМ, 1997, №7 с.2-6
3. Лецинский Л.К., Смотугин С.С., Пирч И.И. Плазменное поверхностное упрочнение. Киев: Техника, 1990, 109 с.
4. Гусев О.А., Лазаренко А.В., Иванов Б.А. и др. Использование импульсного электронного пучка для термической обработки металлов. // МитОМ, 1984, №9
5. Лебедев В.К., Калеко Д.М. Импульсная дуговая термическая обработка поверхности металлов. // МитОМ, 1998, №6. С 8-12.
6. Бойко В.И., Валякв А.Н., Погребняк А.Д. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц. // Успехи физических наук, том 169, №11 с.1-29.
7. Анастасиади Г.П. Формирование химической микронеоднородности в литейных сплавах.— Санкт-Петербург. "Политехника".1992.—146 стр.
8. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Методы поверхностной лазерной обработки.—М.: Высш. шк., 1987.—191 стр.
9. Коваленко В.С., Головкин Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. - Киев: Техника, 1990 г.,—192 с.
10. C. Cordier-Robert, J. Crampon, and J. Foct. Surface alloying of iron by laser melting: microstructure and mechanical properties.// Surface Engineering, 1998, Vol. 14, № 5, p. 381-385.
11. S. Eskin and J. Zahavi.// Lasers Engineering, 1993, №2, p. 181-190.
12. Рыкалкин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов.— М.: "Машиностроение", 1975,—278 с.
13. Волошин М.Н., Гасин Д.А., Кораблева И.Р., Ищенко И.С., Склярченко Н.Н. Изменение структуры армкожелеза при импульсной азотно-плазменной обработке.//ФХОМ, 1993, №1, с. 67-70.
14. Лариков Л.Н., Фальченко В.М., Мазанко В.Ф. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении.// ДАН СССР.—1975.,т. 221, №5.—стр.1073.
15. Лариков Л.Н., Мазанко В.Ф., Немошкаленко В.В., Томашевский Н.А., Фальченко В.М. Исследование аномального массопереноса в условиях ударного нагружения разнородных металлов.// ФХОМ.,1981.,№4.
16. Герцириен Д.С., Скрипниченко А.Л., Тишкевич В.М., Фальченко В.М., Чачин В.Н. Влияние импульсного магнитного поля и растягивающих напряжений на подвижность атомов никеля и меди.// Весті АН БССР. ,1987 г.,№ 4.
17. Герцириен Д.С., Костюченко В.Г., Тишкевич В.М., Фальченко В.М. Влияние пластической деформации в импульсном магнитном поле на миграцию атомов в металлах.//Док.НАН Украины, 1997 г., №3.
18. Герцириен Д.С., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. Импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах.— Наук. Думка, Киев, 1991 г.—208 с.
19. Тюрин Ю.Н. Совершенствование оборудования и технологий детонационного нанесения покрытий.//Автоматическая сварка , 1999г.,№5.,с.13-18.
20. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Теория и практика плазменно-детонационного модифицирования поверхности деталей машин и инструмента.// Сварочное производство.,1994 г., №5, с.23-25.
21. Бай Ши-и. Теория струй. // -М.: Физматгиз, 1960.—326 с.
22. Султанов М.А. Ударносжатая плазма в мощных импульсных разрядах.// -изд. "Дониш", Душанбе,1981.-281с.
23. Лыков А.М., Почелаев В.Г., Редькин Ю.Г., Куминов Е.С. Плазменное термоупрочнение сталей.//ФХОМ., 1997, №3, с.27-32.
24. Лебедев А.Д. Урюков Б.А. Импульсные ускорители плазмы высокого давления.// - АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики; Новосибирск. 1990. -290с.
25. Мордовец Н.М., Борисов Ю.С., Рачек А.П., Тюрин Ю.Н. Структура, кристаллографическая текстура и микротвердость в приповерхностном слое углеродистой стали, модифицированной плазменно-детонационным методом. // - Киев, Наукова Думка, 1994, вып. 28, с.50-57.
26. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н., Ивашов Г. П. и др. Исследование импульсной лазерной закалки штамповой оснастки.// Кузнечно-штамповочное производство. 1987, №12, с. 22-23.
27. Бураков В.В., Федосеенко С.С. Формирование структур повышенной износостойкости при лазерной закалке металлообрабатывающего инструмента. // МитОМ, N5, 1983.

PULSE PLASMA TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR SURFACE MODIFICATION

Yu.N.Tyurin¹⁾, M.L.Zgatkevich¹⁾, A.D.Pogrebnyak²⁾, O.V.Kolisnichenko¹⁾

¹⁾Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine tel: (044) 220 0914 (e-mail: ytyurin@i.com.ua)

²⁾Sumy Institute of Surface Modification, Sumi

Developed technologies provide transfer of the electric energy to the surface of a workpiece through the conducting recoverable layer. These are the technologies of plasma-detonation modification (PDM). In the case of the PDM technology the detonation wave propagates between two coaxial electrodes. In the presence of electric field E, the electric current flows through the gaseous layer, following the detonation wave. Then a second factor, i.e., Joulean heat, joins the detonation wave. Consumable electrodes used here allow the vapours of various metals to be introduced into the jet. PDM is applied for heat treatment of surfaces, their alloying, as well as for coating deposition. When such a pulse plasma jet interacts with a workpiece surface, there forms a region of the shock-compressed plasma, which provides a high-rate heating of the workpiece surface. At the same time, in case of evaporation of the central electrode material, heating can be accompanied by the surface layer alloying. The spot 15-18 mm dia. of the modified surface is formed during one pulse at the 100-150 microns depth of treatment.