

УДК 621.7; 621.373.826

## ПЛАЗМЕННОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© С.М. Босьяков<sup>1</sup>, А.И. Веремейчик<sup>2</sup>, М.И. Сазонов<sup>2</sup>, В.М. Хвисевич<sup>2</sup>, К.С. Юркевич<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь;  
<sup>2</sup>Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

Представлены результаты исследований поверхностной плазменной закалки нержавеющей стали при помощи движущейся плазменной дуги. Реализовано математическое моделирование процесса поверхностной закалки образцов с целью определения параметров закалки для различных материалов.

### 1. ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Для разработки высокоэффективного способа поверхностной плазменной закалки (ППЗ) стальных изделий [1-3] с помощью движущейся плазменной дуги создана экспериментальная установка, оценено влияние параметров плазменной дуги на поверхностный слой образцов, определено влияние параметров упрочнения на физико-механические свойства и износостойкость поверхностного слоя, изучены теплофизические процессы, происходящие в стали в результате воздействия плазменной дуги, исследована микрогеометрия поверхностного слоя в зависимости от параметров процесса. Плазменная установка состоит из плазматрона постоянного тока, силового источника питания дуги, устройства ВЧ-поджига дуги, системы газоснабжения плазматрона аргоном и азотом, системы водоохлаждения плазматрона. Для перемещения плазматрона с заданной скоростью реализовано устройство для плоскопараллельного движения упрочняемой детали относительно плазматрона (рис.1).

Силовой источник обеспечивает горение дуги при напряжениях 14-35 В, токах дуги до 30 А, а его напряжение холостого хода 60 В.

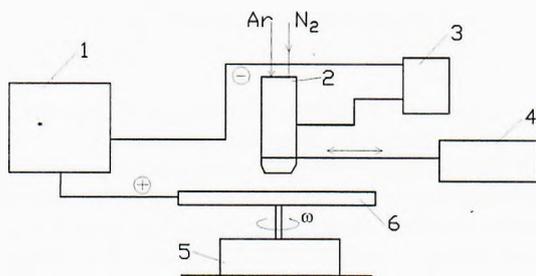


Рис. 1. Принципиальная схема установки для ППЗ: 1 – силовой источник питания; 2 – модернизированный плазматрон; 3 – высокочастотный генератор; 4, 5 – манипуляторы; 6 – упрочняемая деталь

Поджиг дуги производится при помощи высоковольтного ВЧ-генератора, который подключен одним полюсом к катоду плазматрона, другим к его соплу. Перед запуском плазматрона устанавлива-

ются заданные расходы рабочего газа аргона и защитного газа азота. Кроме того, задается определенная скорость перемещения плазматрона на основе предварительно проведенных экспериментах по упрочнению образцов. Затем на плазматрон подается напряжение от силового источника и включается ВЧ-генератор, который обеспечивает пробой газового зазора между катодом и соплом; в этот момент сопло служит поджигающим электродом. По образовавшемуся искровому каналу развивается дежурная дуга между катодом и соплом, при этом ток дуги ограничивается переменным сопротивлением R, которое включено в электрическую цепь между соплом и анодом и устанавливается в пределах 4-6 А, и регулируется изменением величины R. Под действием потока аргона через плазматрон слаботочная дуга выдувается из плазматрона и замыкается на анод-деталь. Приложенное напряжение к плазматрону от силового источника обеспечивает загорание основной дуги между катодом и анодом, а дежурная дуга автоматически отключается.

Проведены исследования вольт-амперных характеристик дуги при токах 7-30 А, при этом напряжение дуги составляет 14-35 В в зависимости от соотношения расходов аргона и азота. Аргон и азот в плазматрон подаются из баллонов высокого давления через редукторы и вентили. Измерение расходов аргона осуществляется при помощи расходомера типа РМ – 0.63 ГУЗ, а азота РМ – 0.063 ГУЗ. Измерения расхода воды производилось при помощи мерного сосуда и секундомера, а температура холодной и нагретой в плазматроне воды – ртутным термометром.

Для перемещения плазматрона относительно закаливаемой детали использован манипулятор с двигателем с магнитным роликом, который приводится во вращательное движение ротором, в свою очередь, ролик катится по торцу модели закаливаемой детали. Кроме того, разработан и изготовлен специальный манипулятор, который непосредственно вращает упрочняемую деталь с заданной скоростью, причем угловая скорость детали может изменяться в пределах 0,5-180 об/мин при помощи разработанной электронной системы управления двигателем. Таким образом, на созданной установке могут проводиться исследования с целью разработки основ поверхностной закалки образцов и деталей.

Для отработки методики процесса ППЗ в качестве материала для образцов выбрана сталь 45, свойства которой достаточно изучены при обработке лазером, микроплазменной дугой и др. [1]. Это обстоятельство позволяет оценить достоверность результатов поверхностного упрочнения с помощью разрабатываемого метода. Кроме стали 45, испытания проводили на образцах из хромистых сталей 40X и 14X17H2.

Для исследования свойств упрочненного поверхностного слоя применялись металлографический, фазовый, рентгеноструктурный анализы, а также ряд общих методик.

Шероховатость поверхностного слоя определяли с помощью измерительного комплекса с лазерным сканированием Mistral 070705 фирмы Brown@sharpe с программным обеспечением PC-dmis. Исследования проводили на плоских образцах, при этом снимались профилограммы и шероховатости  $R_a$ .

Для определения воздействия влияния плазменной дуги на микроструктуру и свойства стали выполнен металлографический анализ.

Для металлографического анализа брали образцы в форме параллелепипеда с нанесенной плазменной дорожкой. Выделение образца осуществляли сечением перпендикулярно нанесенной дорожке.

Подготовка образцов осуществлялась механическим способом при помощи наждачной бумаги N60 или 80 и в окончательном варианте N 600 или 800.

Полирование осуществляли механическим и электролитическим способами.

Электролитическое полирование исследуемой поверхности осуществляли в растворе, состоящем из 43%  $H_3PO_4$ , 33%  $H_2SO_4$ , 10% глицерина и 14%  $H_2O$ , при плотности тока 3-5  $A/m^2$ .

Микростроение материала определили с помощью оптического металлографического микроскопа NEOPHOT-21, при увеличениях в диапазоне 50-1600.

Травление шлифов стали 45 осуществляли в 3%-м спиртовом растворе  $HNO_3$ , стали 40X и 14X17H2 - с помощью реактива Адлера.

Микротвердость по глубине зоны воздействия плазменной дуги определяли по Виккерсу с использованием головки Ханнемана.

Фазовый состав обработанного поверхностного слоя определяли методом дифракции рентгеновских лучей. Измерения осуществляли дифрактометром D8DISCOVER серии 2 (излучение  $CuK\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$  - монохроматическое на дифракционном пучке). Анализ выполняли в диапазоне углов  $2\theta$  от 30 до  $100^\circ$ , с шагом  $0,05^\circ$  и временем отсчета 3 с (генератор:  $U = 40\text{kV}$ ,  $I = 30\text{mA}$ ).

Ввиду анизотропии свойств стали проводили механические испытания образцов на растяжение вдоль и поперек слоев, образованных в результате прокатки металла. Исследования осуществляли на разрывной машине.

Испытания деталей на износ проводили с помощью измерительного комплекса Mistral 070705.

Процесс ППЗ осуществляли на экспериментальных образцах по описанным выше методикам. Сначала термообработку плазменной струей выполняли, изменяя ток дуги  $I$  плазматрона в диапазоне от 13 до 16 А, при напряжении дуги  $U = 34$  Вт и скорости перемещения источника 11 мм/с.

Проведенный металлографический анализ микроструктуры закаленных образцов показал существенные изменения в структуре материала (рис. 2).

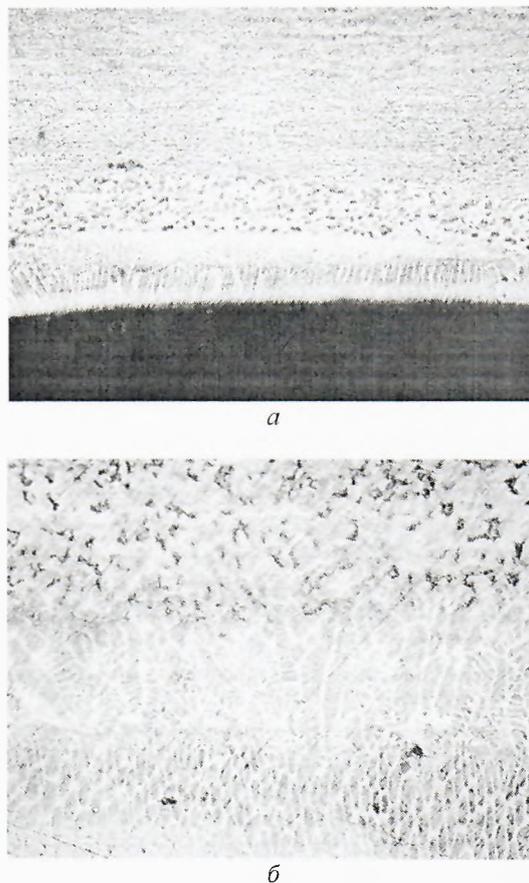


Рис. 2. Микроструктура стали при токах дуги  
а -  $I = 15 \text{ A}$  ( $\times 270$ ); б -  $I = 15 \text{ A}$  ( $\times 675$ )

В зоне воздействия плазменной струи четко выделяется три резко отличающихся слоя.

Во внутренней зоне, плавно переходящей в исходный металл, наблюдается преимущественная ориентировка зерен (текстура), которая возникает вследствие пластической деформации и аналогичной структуре ядра материала. Граница этой зоны соответствует глубине теплового влияния плазменной струи.

Вторая зона состоит из равноосных зерен рекристаллизованного материала. Этот слой был подвержен расплавлению и при такой температуре произошел процесс перекристаллизации.

Поверхностный слой обработанной стали содержит дендритную структуру, возникающую в процессе перекристаллизации материала. На микрофотографиях (см. рис. 2, а) при увеличении  $\times 270$

хорошо видна зона столбчатых кристаллов, ориентированных в направлении источника тепла. Дендритная структура материала хорошо наблюдается при увеличении  $\times 675$  (см. рис. 2, б), она возникла вследствие быстрого охлаждения нагретого материала. Как видно, увеличение тока ведет к значительному расширению зоны теплового воздействия плазменной дуги. При  $I = 16$  А четко можно наблюдать все три характерных слоя. При  $I = 13$  А зона теплового воздействия просматривается меньше. Установлено, что изменения напряжения плазменной дуги также влияют на размер зоны теплового воздействия дуги. Так при таких же токах изменение напряжения до 28 В приводит к уменьшению зоны влияния струи, однако влияние напряжения на структурообразование по сравнению с рассматриваемыми параметрами незначительно.

Проведен анализ микротвердости стали при различных расходах защитного газа азота (рис.3).

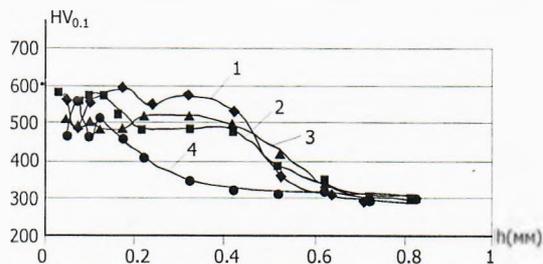


Рис. 3. Характер распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя при различных расходах защитного газа азота:  
 1 –  $Q = 3,6$  л/мин; 2 –  $Q = 2,4$  л/мин; 3 –  $Q = 1,8$  л/мин;  
 4 –  $Q = 1,2$  л/мин

Результаты исследований влияния величины расхода защитного газа на процесс ППЗ показывают, что изменение расхода азота в пределах  $Q = 3,6-1,8$  л/мин незначительно влияет на величину микротвердости и глубину упрочнения. Только при  $Q = 1,2$  л/мин наблюдается резкое уменьшение области упрочнения.

Анализ результатов исследований показывает, что характер распределения микротвердости в этом случае подобен распределению микротвердости по глубине поверхностного слоя в двух рассмотренных выше случаях. Глубина упрочненного слоя достигает 0,55 мм и ее значения почти в 2 раза выше значений микротвердости материала в исходном состоянии.

Следует заметить, что значительное увеличение твердости материала является результатом объемного влияния образующих фаз и главной фазы  $Fe_3N$  при незначительном влиянии других фаз, а также образованием в поверхностном слое азотистого мартенсита.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ В ANSYS

Проведено математическое моделирование процесса поверхностной плазменной закалки. В ходе проведения вычислительного эксперимента разработана трехмерная модель пластинки, геометрические размеры которой принимались равными  $100 \times 100 \times 7$  мм. При решении нестационарной температурной задачи использовался предназначенный для анализа переходных процессов восьмиузловой термический элемент PLANE77, который имеет одну степень свободы (температура в каждой точке). В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели реза пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде линейной функции зависимости температуры от времени. Максимальная температура пятна составляет  $1200$  °С (начальная температура  $20$  °С), скорость движения пятна направлена вдоль ребра пластинки и составляет  $9,5$  мм/с, материал изделия – сталь. На всех поверхностях модели задавалась конвекция: на поверхности по которой движется плазменная струя коэффициент конвекции составлял  $100$  Вт/(К·м<sup>2</sup>), на всех остальных –  $1000$  Вт/(К·м<sup>2</sup>). Теплопроводность стали принималась равной  $39$  Вт/(К·м).

Основой термоанализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, которое получается из принципа сохранения энергии. Конечно-элементное решение заключается в получении значений узловых температур, на основе которых вычисляются остальные термические величины.

После каждого шага нагружения проводился расчет температурных полей, возникающих в расчетной модели, результаты которого записывались в LS-файлы. Для получения общего решения необходимо выполнить совместное решение по определенному количеству LS-файлов, указав соответствующее количество шагов. В результате проведения расчета определены поля температур в различные промежутки времени.

На рис. 4 и 5 показаны температурные поля соответственно на верхней и нижней гранях в момент времени 4,5 с.

Отметим, что в момент времени 9,5 с температурное пятно пройдет по всей длине грани пластинки.

Ниже представлен график изменения температуры в узле 361, к которому прикладывалась температурная нагрузка в момент времени 9 с (рис. 6).

В таблице отражены значения температуры в различные моменты времени в узле 371, который располагается на нижней грани пластинки, к которой подавалось охлаждение.

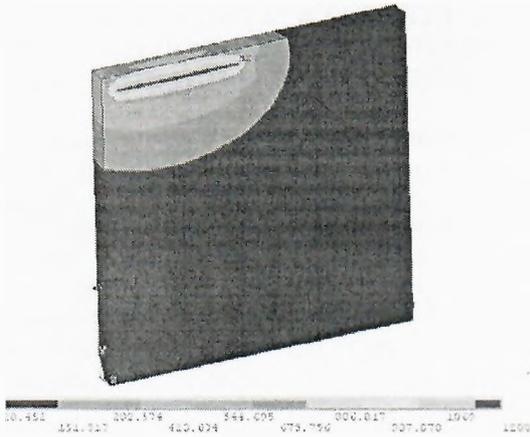


Рис. 4. Температурные поля на верхней грани в момент времени 4,5 с

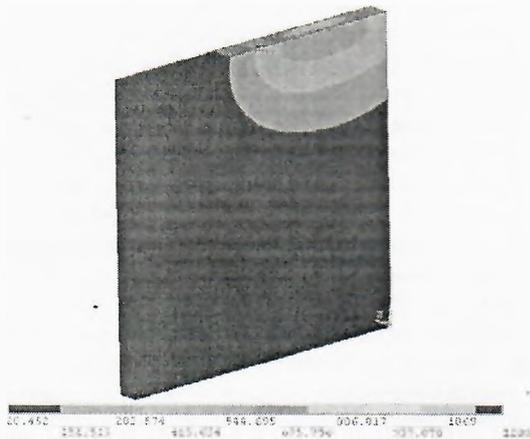


Рис. 5. Температурные поля на нижней грани в момент времени 4,5 с

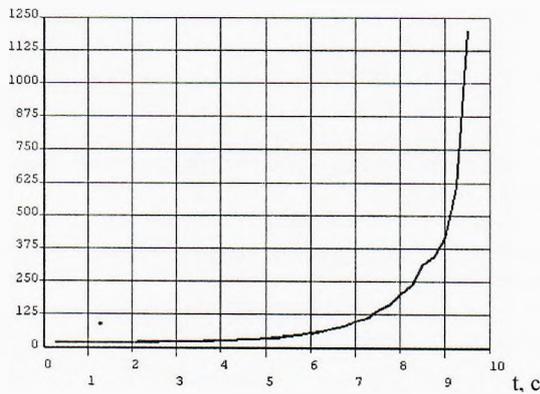


Рис. 6. Зависимость температуры от времени в узле 361

Таблица 1  
Значения температуры в узле 371

T, c	1	3	5	6	7	8	9
T, °C	34,6	110	517	676,5	707,1	714,5	716,8

Отметим, что результаты теплового анализа сохраняются в файле с расширением gth и могут быть использованы при проведении статического анализа (определении напряженно-деформированного состояния) модели в качестве внешней нагрузки.

Полученные результаты нестационарного температурного анализа могут быть непосредственно использованы для установления оптимальных режимов работы плазмотронов и других устройств, позволяющих проводить обработку металлоизделий высокотемпературной плазменной струей.

### 3. ЗАДАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

В следующем анализе задавалась функция температуры, зависящей от времени, которая прикладывалась к центру пластинки и все ее физико-механические свойства аналогичны предыдущей задаче. Функция имела вид  $T = 10t^3 \exp(-0,7t)$ , где  $T$  – температура,  $t$  – время. Промежуток времени был выбран от 0 до 15 с.

В результате проведенного расчета была получена картина распределения температур (рис. 7).

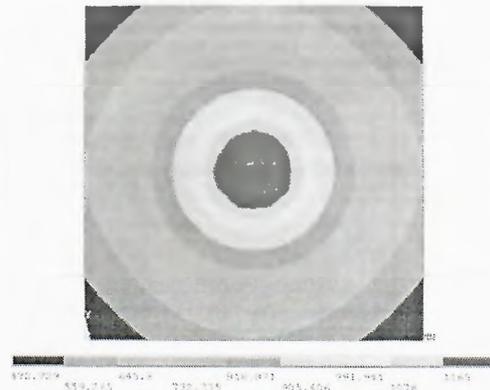


Рис. 7. Температурное поле, соответствующее моменту времени 7,5 с

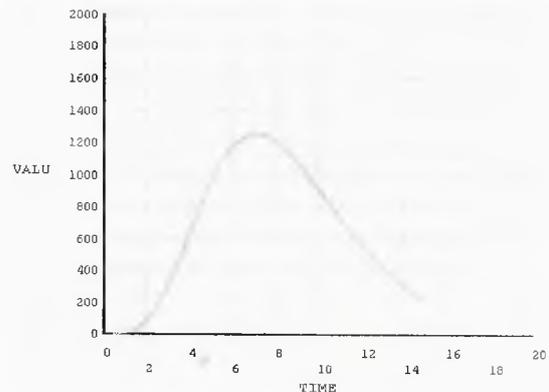


Рис. 8. График зависимости температуры от времени

Следует отметить, что в данный момент времени 7,5 с температура достигает своего максимума и составляет 1252 °С. Но в исследуемой задаче, учитывая специфику заданной функции, результат изменения температуры наиболее интересно просматривать в виде графика (рис. 8).

Данный график показывает изменение температуры во времени в узле, находящемся в центре пластинки, т.е. в области, к которой была приложена температурная нагрузка. Существует возможность построения графика в любом узле модели.

Далее в соответствии с вышеуказанной методикой проводился статический анализ исследуемой модели. Приведенные ниже рис. 9 и 10 показывают напряженно-деформированное состояние пластинки в случае жестко закрепленных вертикальных граней. Данные рисунки отражают напряженно-деформированное состояние в момент времени 7,5 с, т.е. в момент максимальной температуры равной 1252 °С.

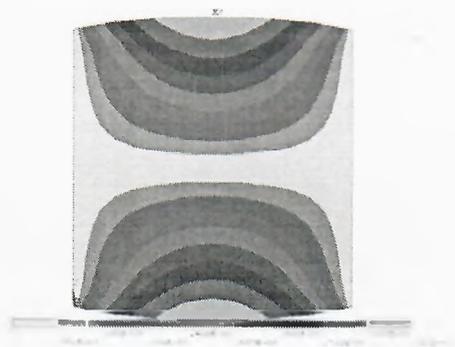


Рис. 9. Суммарные перемещения в момент времени 7,5 с

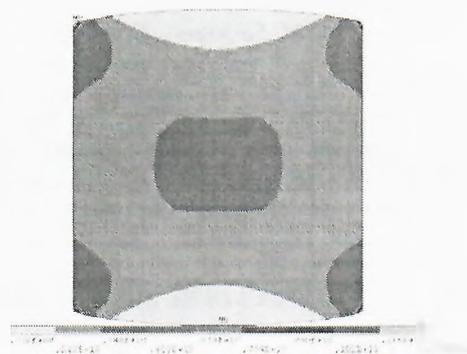


Рис. 10. Напряжения по Мизесу в момент времени 7,5 с

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н.В. Спиридонов и др. *Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин*. Мн.: «Высшая школа», 1988, 155 с.
2. Н.Н. Рыкалин и др. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник*. М.: «Машиностроение», 1985, 485 с.
3. С.П. Кундас. *Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: Монография*. Мн.: «Бестпринт», 2005, 313 с.

**ПЛАЗМОВЕ ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛІВ І ЙОГО МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

*С.М. Босяков<sup>1</sup>, А.І. Веремейчик<sup>2</sup>, М.І. Сазонов<sup>2</sup>, В.М. Хвісевіч<sup>2</sup>, К.С. Юркевіч<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup> Білоруський державний університет, м. Мінськ, Білорусь;  
<sup>2</sup> Брестський державний технічний університет, м. Брест, Білорусь

Представлені результати досліджень поверхневого плазмового гарту неіржавіючої сталі за допомогою рухомої плазмової дуги. Реалізовано математичне моделювання процесу поверхневого гарту зразків з метою визначення параметрів гарту для різних матеріалів.

**PLASMA SUPERFICIAL HARDENING OF METALS AND ITS MATHEMATICAL MODELLING**

*S.M. Bosjakov<sup>1</sup>, A.I. Veremejchik<sup>2</sup>, M.I. Sazonov<sup>2</sup>, V.M. Hvitsevich<sup>2</sup>, K.S. Jurkevich<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup> Belarus state university, Minsk, Belarus  
<sup>2</sup> Brest state technical university, Brest, Belarus

In clause results of researches of superficial plasma training of stainless steel by means of a moving plasma arc are presented. Mathematical modelling process of superficial training of samples with the purpose of definition of parameters of training for various materials is realized.