

УДК 621.7;621.373.826

С.М. Босяков<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>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет  
г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Брестский государственный технический университет  
г. Брест, Беларусь

*Results of researches of plasma surface hardening of stainless steel by means of a moving plasma arc are presented. Modelling process of hardening of samples with the purpose of definition of parameters of treatment for various materials is realized.*

В работах [1–5] отмечено, что поверхностное упрочнение сталей с помощью плазменного источника нагрева является перспективным, но недостаточно изученным процессом. Судя по литературным источникам, исследователи уделяют больше внимания процессам упрочнения с помощью лазера и электронного луча. Однако для тех и других способов упрочнения представляет интерес исследования зоны влияния, микроструктуры, твердости, температурных полей в области нагрева, скоростей нагрева и охлаждения металла при движущемся локальном источнике тепла. Как известно, воздействие высококонцентрированных источников нагрева на поверхность стальных изделий приводит к структурным, фазовым и аллотропическим превращениям в металле. В этой связи изучение влияния тепловых процессов на формирование упрочненного поверхностного слоя с целью получения оптимальных прочностных и износостойких свойств, обусловленных этими превращениями представляет важную задачу.

Для анализа теплофизических параметров в поверхностном слое металла необходимо подобрать оптимальные режимы процесса упрочнения, которые зависят от характеристик генератора плазмы: тока дуги, напряжения дуги, рода защитного и плазмообразующего

газов, скорости движения источника, расстояния от среза сопла плазмотрона до поверхности детали и т.д.

Экспериментами установлено, что поверхностное упрочнение сталей высококонцентрированными источниками нагрева можно осуществлять с оплавлением и без оплавления поверхности. Для примера на рис. 1 приведен образец без оплавления поверхности.

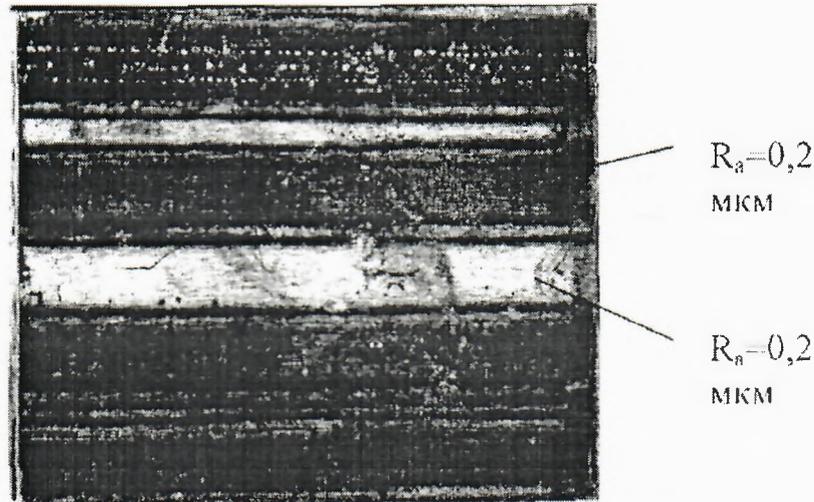


Рис. 1. Формирование микрогеометрии поверхности образца без оплавления поверхности, увеличение  $\times 2,2$

Воздействие плазменной дуги на поверхность образца приводит к изменению микрогеометрии поверхности. При упрочнении в твердой фазе закалка металла происходит без оплавления и шероховатость поверхности остается такой же, как и при механической обработке в исходном состоянии. Шероховатость поверхности  $R_a=0,1$  мкм после механической обработки образцов сохраняется такой же и после обработки плазменной дугой. Поверхность образца с оплавлением имеет сложный рельеф, обусловленный системой впадин и гребней и требует последующей обработки.

Экспериментами установлено, что при закалке поверхности в твердой фазе целесообразно применить аргон в качестве защитного газа, который в меньшей степени, чем азот, обжимает дугу. При этом снижается плотность потока энергии, которую поглощает поверхность, и температура поверхностного слоя металла получается ниже температуры плавления.

## 1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Плазменная установка состоит из плазмотрона постоянного тока, силового источника питания дуги, устройства ВЧ-поджига дуги, системы газоснабжения плазмотрона аргоном и азотом, системы водоохлаждения плазмотрона. Для перемещения плазмотрона с заданной скоростью реализовано устройство для плоскопараллельного движения упрочняемой детали относительно плазмотрона. Силовой источник обеспечивает горение дуги при напряжениях до 35 В, токах дуги до 30 А, а его напряжение холостого хода 60 В.

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. Для исследования свойств упрочненного поверхностного слоя применялись металлографический, фазовый, рентгеноструктурный анализы.

Для определения воздействия влияния плазменной дуги на микроструктуру и свойства стали выполнен металлографический анализ. Для металлографического анализа взяты образцы в форме параллелепипеда с нанесенной плазменной дорожкой.

Микростроение материала определялось с помощью оптического металлографического микроскопа НЕОРНОТ-21, при увеличениях в диапазоне 50–1600.

Фазовый состав обработанного поверхностного слоя определяли методом дифракции рентгеновских лучей. Измерения осуществляли дифрактометром D8DISCOVER серии 2.

Процесс ППЗ осуществлялся на экспериментальных образцах по описанным выше методикам. Термообработка плазменной струей выполнялась, изменяя ступенчато ток дуги  $I$  плазмотрона в диапазоне от 13 до 16 А, при напряжении дуги  $U=34$  Вт и скорости перемещения источника 11 мм/с.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Проведенный металлографический анализ микроструктуры закаленных образцов показал существенные изменения в структуре материала. 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. Дендритная структура материала хорошо наблюдается при увеличении  $\times 675$ , она возникла вследствие быстрого охлаждения нагретого материала. Как видно, увеличение тока ведет к значительному расширению зоны теплового воздействия плазменной дуги.

Эксперименты проводились с использованием в качестве защитного газа как аргона так и азота. Следует заметить, что при использовании азота наблюдается больший рост твердости стали. Эксперименты показали, что микротвердость поверхности стали неоднородна, ее распределение по ширине зоны влияния плазменной дорожки подчинено определенному закону (рис. 2). В этой связи возникает присущая для обработки поверхностей локальными высококонцентрированными источниками тепла специфическая особенность – упрочнение поверхности изделий отдельными полосками.

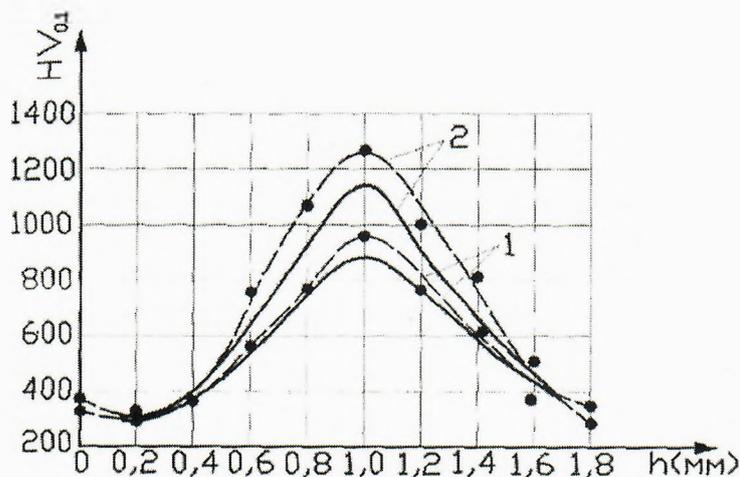


Рис. 2. Распределение микротвердости по ширине зоны влияния плазменной дуги: 1 – защитный газ аргон, 2 – защитный газ азот (— – без оплавления; ---•--- – с оплавлением)

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS

Проведено математическое моделирование процесса поверхностной плазменной закалки. В ходе проведения вычислительного эксперимента разработана трехмерная модель пластинки, геометрические размеры которой принимались равными 100×100×7 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·м²), на всех остальных – 1000 Вт/(К·м²). Теплопроводность стали принималась равной 39 Вт/(К·м).

Основой термоанализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, которое получается из принципа сохранения энергии [6–8]. 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. 3 представлены температурные поля соответственно на верхней и нижней гранях, соответствующие моменту времени 4,5 с.

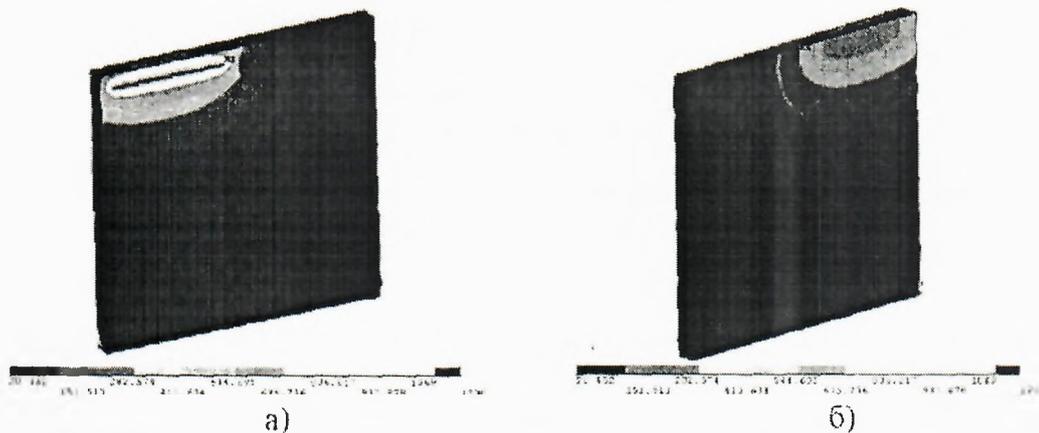


Рис. 3. Температурные поля в момент времени 4,5 с: а) верхняя грань; б) нижняя грань

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. 4). В таблице 1 приведены значения температуры в различные моменты времени в узле 371, который располагается на нижней грани пластинки, к которой подавалось охлаждение.

Таблица 1. Значения температуры в узле 371

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

В следующем анализе задавалась функция температуры, зависящей от времени, которая прикладывалась к центру пластинки, все физико-механические свойства которой аналогичны предыдущей задаче. Функция имела вид

$$T = 10t^5 \exp(-0,7t),$$

где T – температура, t – время. Промежуток времени был выбран от 0 до 15 с.

В результате проведенного расчета была получена картина распределения температур, представленная на рис. 5.

Следует отметить, что в данный момент времени 7,5 с температура достигает своего максимума и составляет 1252 °C. Но в исследуемой задаче, учитывая специфику заданной функции, результат изменения температуры наиболее интересно просматривать в виде графика, приведенного на рис. 6.

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 выше указанной методикой проводился статический анализ исследуемой модели. Приведенные ниже рисунки показывают

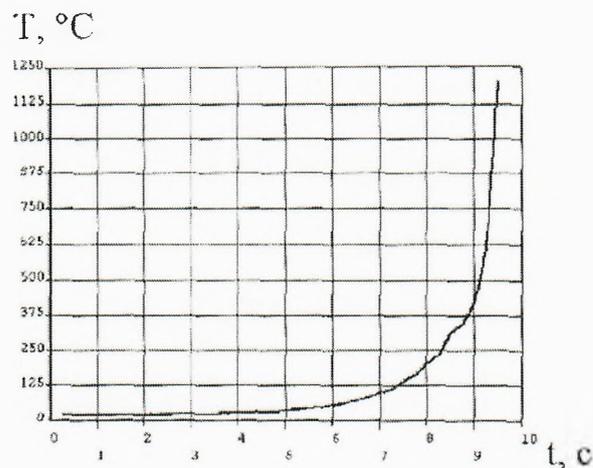


Рис. 4. Зависимость температуры от времени в узле 361

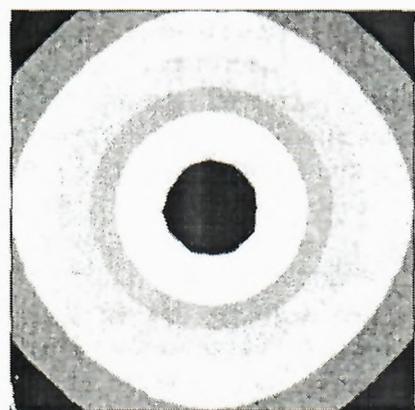
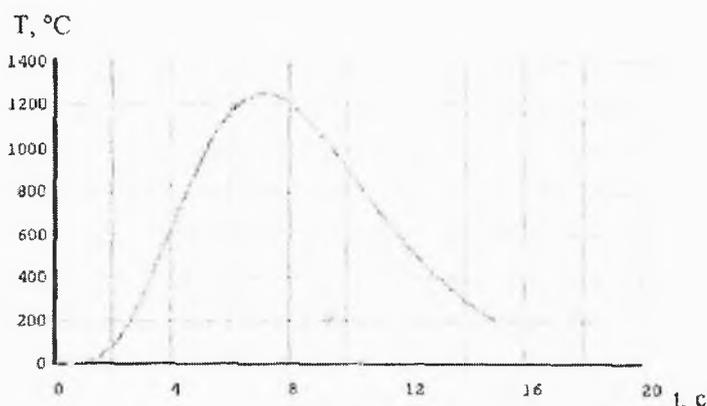


Рис. 5. Температурное поле, соответствующее моменту времени 7,5 с

Рис. 6. График зависимости температуры от времени



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.

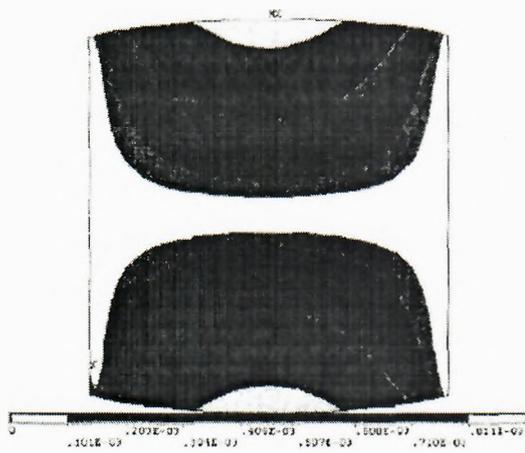


Рис. 7. Суммарные перемещения в момент времени 7,5 с

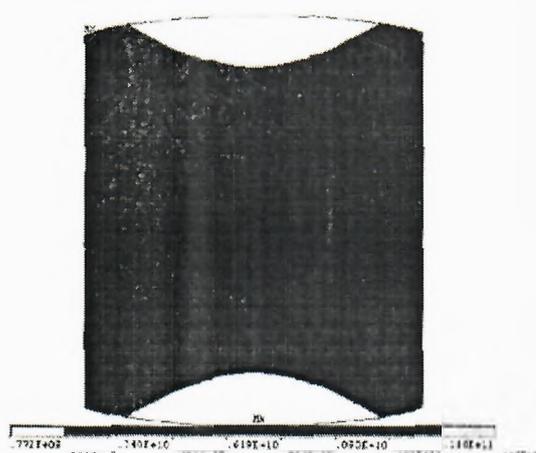


Рис. 8. Напряжения по Мизесу в момент времени 7,5 с

Кроме того, проведено моделирование движения струн по поверхности многосвязной области на примере пластинки с отверстием. Температура плазменной дуги принималась равной 1000 °С, материал – сталь с теплопроводностью 60,5 В/К м. Для различных скоростей движения плазменной струи получены зависимости температуры от координат и времени. Типичное распределение температуры при движении струи вокруг круглого отверстия со скоростью 20 мм/с показано на рис. 9 и 10.

Отметим, что результаты теплового анализа сохраняются в файле с расширением rth 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.

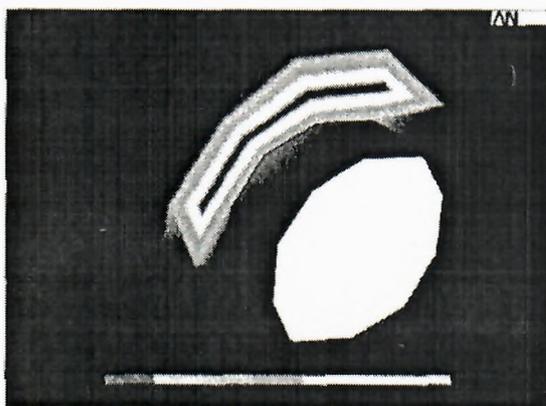


Рис. 9. Распределение температуры по верхней грани пластинки

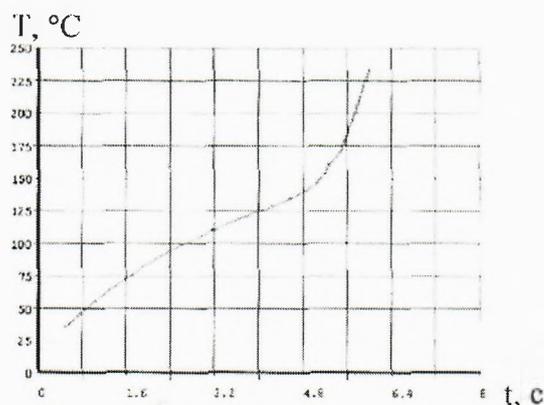


Рис. 10. Зависимость температуры от времени в узле 1396

### Список использованных источников

1. Хвисевич В.М., Сазонов М.И., Якушев С. Использование генераторов плазмы с высокой концентрацией энергии в технологических процессах упрочнения // *Materialy seminaryjne IV Konferencji naukowo – praktycznej. Białystok – Suwałki, 2005.* – S. 17 – 23.
2. Chyisevich V.M., Sazonow M.I., Jakuszewicz S. Kształtowanie mikrostruktury powierzchni stali chromowej H17N2 podczas obróbki plazmowej w środowisku ochronnym azotu // *Inżynieria powierzchni – Warszawa.* № 4, 2005. S. 34 – 38.
3. Спиридонов Н.В. и др. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. – Мн. «Вышэйшая школа». – 1988. – 158 с.
4. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная и электрошо-лучевая обработка материалов: Справочник. – М.: Машиностроение. 1985. – 485 с.
5. Куидас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с.
6. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс-2005. – 640 с., ил.
7. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смоляк. ANSYS для инженеров. – М.: Машиностроение. – 2004. – 466 с.
8. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.