

## ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ В ХРОМИСТЫХ СТАЛЯХ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОРОТКОИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2018 В.А. Путилин, А.В. Камашев

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 25.06.2018

Работа посвящена анализу возможностей упрочнения поверхностного слоя хромистых сталей с использованием короткоимпульсного лазерного излучения. Экспериментально показана возможность использования лазера с наносекундной длительностью импульсов для создания микроскопических областей с заданным концентрационным распределением легирующих элементов по глубине зоны воздействия.

*Ключевые слова:* короткоимпульсное лазерное воздействие, упрочняющая обработка, хромистые стали, концентрационное распределение легирующих элементов.

Одним из направлений в технологии поверхностной упрочняющей обработки металлов и сплавов является лазерное упрочнение [1-4]. Достоинством этого вида обработки является возможность создавать в поверхностных слоях локальных областей упрочненного материала, обладающих заданным комплексом физико-механических и химических свойств. Использование с этой целью коротких (порядка наносекунд) лазерных импульсов значительно расширяет возможности данного вида обработки, поскольку наряду с чисто термическим воздействием возникает механическое воздействие на обрабатываемый материал. При определенных плотностях мощности излучения воздействия происходит генерация ударных волн высокого давления, что позволяет осуществлять массоперенос легирующих элементов вглубь обрабатываемого материала на расстоянии, значительно превышающие глубину их проникновения при обычной диффузии.

В более ранних работах [5-6] нами было теоретически доказано, что массоперенос в металлах при воздействии коротких лазерных импульсов осуществляется путем увлечения межъядерных атомов фронтом лазерно-индуцированной ударной волны. В настоящей работе обосновывается возможность использования этого вида легирования металлов для создания микроскопических областей на поверхности обрабатываемого материала с измененным химическим составом, и обладающим другим набором физико-механических свойств.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы из хромистых сталей ШХ15 9ХС и 9Х14 толщиной 8 мм механически полировали и отжигали при температуре 1200°C в течение двух часов вакууме  $1,35 \cdot 10^{-2}$  Па. Приготовленные образцы обрабатывались короткими импульсами излучения рубинового лазера (длина волны излучения  $\lambda_{изл} = 0,687$  мкм) в режиме модулированной добротности. Длительность импульсов составляла  $\tau_{имп} \sim 30$  нс. Диаметр пятна излучения на поверхности мишени составлял величину порядка 3,5 мм. Поэтому плотность мощности лазерного излучения оценивалась как  $I_{max} \sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Возникновение лазерно-индуцированных ударных волн при таких параметрах импульсного лазерного воздействия было теоретически обосновано и экспериментально изучено авторами работ [1-6]. Механизм возникновения ударной волны в металлической мишени обусловлен импульсом отдачи испаряющегося тонкого ( $\sim 0,1$  мкм) поверхностного слоя металла. Давление в такой ударной волне рассчитанное согласно методике, разработанной авторами работы [6] по эмпирической формуле (1):

$$P_{max} = 28,56 \left( \frac{I_{max}}{2 \cdot 10^{11} \text{ кВт/см}^2} \right)^{0,83} \times \left( \frac{\lambda_{изл}}{0,438 \text{ мкм}} \right)^{-0,056} \times \left( \frac{\tau_{имп}}{0,8 \text{ нс}} \right)^{-0,138} \quad (1)$$

$P_{max}$  составило величину порядка 20 ГПа, скорость механического нагружения оценивалось нами как  $\sim 10^7$  с<sup>-1</sup>.

Электронно-микроскопические исследования поверхности зоны воздействия, проводились на растровом электронном микроскопе PHILIPS. Затем был проведен послойный по глубине зоны лазерного воздействия микрорентгеноспектральный анализ на установке "SUPERPROB-739".

Путилин Владислав Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Общая физика и физика нефтегазового производства».

Камашев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика и физика нефтегазового производства». E-mail: physics@samgtu.ru

**ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

В результате проведенных исследований обнаружено появление на обрабатываемой поверхности следов эрозии (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Электронная растровая микрофотография поверхности никеля с нанесенным слоем меди после короткоимпульсного лазерного воздействия. Увеличение 2000<sup>x</sup>

На микрофотографии имеются следы эрозии поверхности в результате абляции, свидетельствующих о мощных гидродинамических процессах в зоне лазерного воздействия.

В более ранних работах [5, 6] нами аналитически было получено решение уравнения массопереноса в ударных волнах.

При определенных допущениях и ограничениях лазерно-индуцированную ударную волну можно считать плоской. Рассмотрим процесс транспорта атомов вещества из поверхностного слоя в объем полубесконечного твердого тела под действием поля напряжения плоской ударной волны и градиентом температуры.

Зависимости массопереноса с учетом бародиффузии и термодиффузии можно записать в виде

$$D_T = DQ/kT, \tag{2}$$

$$D_p = DV/kT, \tag{3}$$

где  $C$  – концентрация,  $D$  – коэффициент массопереноса,  $P$  – давление,  $K_p \cdot D$  – коэффициент бародиффузии,  $K_T \cdot D$  – коэффициент термодиффузии.

При этом, импульс давления принимался в виде солитона, а тепловая волна описывалась ступенчатой функцией Хевисайда:

$$P(x, t) = P_0 \cdot \text{ch}^{-2}(x - vt - x)/x_0, \tag{4}$$

$$T(x, t) = T_0 \cdot \Theta(v_T \cdot t - x), \tag{5}$$

где  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $v$  – скорость распространения ударной волны,  $x_0$  – полуширина ударного импульса,  $\Theta$  – ступенчатая функция Хевисайда.

Исследованиями установлено, что распределение концентрации легирующих элементов и углерода по глубине от поверхности образца на-

поминает характер затухающих колебаний. Период такой «волны концентрации» различных элементов составляет от 60 до 90 мкм. Полагая значение продольной скорости звука для железа и сталей равной  $6 \cdot 10^3$  м/с, то при длительности лазерного импульса  $\tau = 30$  нс в пересчете на частоту колебаний, получаем значение порядка  $10^8$  Гц, что соответствует границе ультразвуков и гиперзвуковых диапазонов длин волн. Известно, что граница гиперзвуковых и ультразвуковых колебаний соответствует переходу от тепловых колебаний к механическим (т.е. звуковым) колебаниям. Это можно рассматривать как переход от термической активации процесса массопереноса (т.е. диффузии) к безактивационному (т.е. сдвиговому) движению атомов. Объект массопереноса в этом случае будет – кооперативно движущаяся сверхструктура атомов (кластер), обладающая всеми признаками макроскопического тела. Причина движения такого образования – макроскопические динамические внешние силы (интенсивные внешние воздействия). Понятно, что при таком движении объект массопереноса (кластер) будет зависеть от макроскопических свойств среды, а именно: от сил вязкого сопротивления.

Характер затухания такой волны должен быть связан со сдвиговой динамической вязкостью металла-матрицы (железа или стали). По уменьшению амплитуды можно определить логарифмический декремент затухания  $L$  такой концентрационной волны. Из полученных экспериментальных данных следует, что уменьшение амплитуды «волны концентрации» до значения, указанного соответствующим ГОСТом для различных марок сталей происходит примерно через три периода. Пользуясь известной зависимостью:

$$L = \beta T = 1/N, \tag{6}$$

где  $\beta$  – коэффициент затухания,  $T$  – период колебаний,  $N$  – число колебаний, когда амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз, можно вычислить основные вязкие свойства среды.

Отсюда

$$\beta = \frac{1}{NT}. \tag{7}$$

Так, используя экспериментальные данные т.е.  $N = 3$  и  $T = l/c_{зв} = 6 \cdot 10^{-5} / 6 \cdot 10^3 = 10^{-8}$  с можно определить коэффициент затухания  $\beta$ , который при указанных данных будет равен  $\beta = 0,33 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ .

По коэффициенту затухания можно определить коэффициент сопротивления движению точечного дефекта

$$R = 2m\beta, \tag{8}$$

где  $m$  – масса межузельного атома ( $m \sim 10^{-26}$  кг).

Сила сопротивления пропорциональна скорости движения дефекта. Если считать, что сопротивление вызвано сдвиговой вязкостью, то используя закон внутреннего трения Ньютона,

а также выражение (7), можно приближенно записать

$$\beta \sim \frac{2\pi\eta_{сдв}}{T^2 \rho c_{зв}^2}, \quad (9)$$

где  $\eta_{сдв}$  – коэффициент динамической сдвиговой вязкости среды. Тогда из экспериментальных данных можно определить этот коэффициент как

$$\eta_{сдв} \sim \frac{\beta T^2 \rho c_{зв}^2}{2\pi}. \quad (10)$$

Из полученных экспериментальных данных он имеет порядок величины  $\sim 150$  Па·с.

Коэффициент кинематической сдвиговой вязкости (фактически коэффициент массопереноса при сдвиговых процессах)  $\nu_{сдв} = \eta_{сдв}/\rho$  для железа и сталей на основании полученных экспериментальных данных  $\sim 0,02$  м<sup>2</sup>/с.

### ВЫВОДЫ

1. На основании данного исследования, а также теоретических исследований, проведенных ранее, установлено, что массоперенос в металлах при короткоимпульсном лазерном воздействии осуществляется путем увлечения межузельных атомов в поле лазерно-индуцированной ударной волны. Об образовании ударных волн свидетельствует появление на обрабатываемой поверхности следов мощных гидродинамических процессов.

2. Одной из возможных причин ускоренного массопереноса является каналирование поверхностных слоев обрабатываемого материала и создание условий для экструзирования расплавленного легирующего материала вглубь образца.

3. Продемонстрирована техническая возможность создания в приповерхностных областях обрабатываемого материала слоев с из-

менным содержанием элементов, а также чередования слоев с повышенным и пониженным содержанием легирующего материала.

4. Массоперенос углерода и легирующих элементов по глубине зоны лазерного воздействия при прохождении лазерно-индуцированной ударной волны носит характер затухающих колебаний концентрации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кристал М.А., Жуков А.А., Кокора А.Н. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. М.: Металлургия. 1973. 192 с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение. 1985. 496 с.
3. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов. Самара: Изд. Самарского университета, 2001. 392 с.
4. Путилин В.А., Камашев А.В. Анализ кинетического уравнения массопереноса, инициируемого короткими импульсами лазера // Письма в ЖТФ, 1997, Т.23, В.5, С.84-87.
5. Динамика межузельного атома в поле плоской лазерно-индуцированной ударной волны / В.А. Путилин, А.М. Штеренберг, А.В., А.И. Крестелев // Вестник СамГТУ, 2000, №9, С.190-191. Камашев
6. Лебо А.И., Лебо И.Г., Батани Дж. Зависимость давления в сжатом конденсированном веществе от параметров мощных лазерных импульсов // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 8, С. 749-754.
7. Яковлев М.А. Особенности взаимодействия пикосекундных лазерных импульсов средней мощности с конденсированным веществом // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 1, С. 442-448.
8. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные.
9. Физическая энциклопедия в 5-ти томах [под ред. А.М.Прохорова], М.: Российская энциклопедия, 1998.

### FORMATION OF SURFACE OF CR-STEELS UNDER APPLICATION OF SHORT PULSE LASER

© 2018 V.A. Putilin, A.V. Kamashev

Samara State Technical University

The work is devoted to the analysis of surface alloying of metals and alloys using short pulse laser radiation. Experimentally the possibility of using nanosecond laser pulse duration to create microscopic fields with the given concentration distribution of alloying elements in depth treatment zones

*Keywords:* Short pulse laser influence, strengthening process, concentrational distribution, processing layer, melting

Vladislav Putilin, Senior Lecturer at the General Physics and the Physics of Oil and Gas Production Department  
Andrey Kamashev, Candidate of Technics, Associate Professor at the General Physics and the Physics of Oil and Gas Production Department. E-mail: physics@samgtu.ru