

МИКРОСТРУКТУРА ЗОНЫ ОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

И.Е. Гнатюк, В.А. Андриющенко, В.И. Бондарь, Е.Н. Дзевин

Институт металлофизики НАН Украины (Киев)

Украина

Поступила в редакцию 17.04.2003

Исследовали воздействие лазерных импульсов ($E = 20$ Дж, $\tau = 0,8$ мс, $n \leq 5$) на один и тот же участок поверхности образцов сплавов Fe-Al-C и Fe-Al-Mn-C. Установили, что при увеличении количества импульсов до 5, последующие зоны оплавления уменьшаются по отношению к первоначально расплавленным зонам. При $1 < n \leq 5$ оплавленный объем разделяют границы, количество которых соответствует количеству импульсов. Изменение объема зон оплавления объяснили изменением теплопроводности этих зон из-за восходящей диффузии углерода из глубины образцов к обрабатываемой поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Общим для всех случаев лазерной обработки является неоднородное распределение легирующих элементов по глубине с резким изменением свойств (концентраций, параметров решетки и микротвердости) у нижней границы проплавленной зоны [1]. Как установили авторы [2], в нижней части зоны оплавления обе фазы, жидкая и твердая, имеют наибольшую концентрацию углерода и других легирующих элементов. Авторы [3,4] показали, что при импульсной лазерной обработке происходит восходящая диффузия атомов внедрения. За время действия импульса атомы углерода направленным кооперативным потоком перемещаются из глубинных слоев к обрабатываемой поверхности [3].

Приведенные утверждения инициировали предположение, что последующие импульсы лазерного излучения будут воздействовать как бы на иной, обогащенный атомами внедрения материал. Авторы настоящей работы предположили, что многократное лазерное воздействие в одну точку поверхности будет приводить к относительному уменьшению зоны оплавления при каждом последующем импульсе. Поэтому, в настоящей работе была поставлена задача – изучить структурное состояние зоны оплавления в зависимости от количества и плотности энергии импульсов лазерного воздействия направленных в одну и ту же точку поверхности.

Структурные изменения в зоне термического влияния, которая расположена ниже оплавленной зоны, подробно исследованы на монокристаллических образцах сплавов Fe-Al-C и описаны в работе [5]. В этой зоне фиксируется прослойка с низким содержанием атомов внедрения. Волнистый рельеф, возникающий на поверхности кратера оплавленных участков поликристаллических образцов при импульсном лазерном воздействии,

изучен и описан в работе [6] и в настоящей работе не рассматривается.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалом для исследования служили сплавы Fe-Al-C и Fe-Mn-Al-C.

Поликристаллические образцы подвергались лазерному воздействию с оплавлением поверхности на установке КВАНТ-18М, длительность импульса $\tau = 0,8$ мс, частота импульсов $n = 2$ сек, диапазон энергий $5 \div 20$ Дж. Металлографические исследования проводили на микроскопе МИМ-7. Образцы для микроструктурных исследований получали последовательным шлифованием, полированием и химическим травлением поликристаллических образцов в плоскости, параллельной направлению оси лазерного луча.

Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3. Химический и фазовый состав исследованных образцов приведен в табл. 1.

Таблица 1
Химический и фазовый состав
исследованных образцов

№ сплава	Хим. состав, мас. %				Фазовый состав, %			
	C	Mn	Al	Fe	α_m	K_ϕ	α_{Fe-Al}	γ
1	2	–	4	ост.	55	~5	–	ост.
2	2	–	6	ост.	~35	~5	–	ост.
3	2	–	10	ост.	10	~75	~5	ост.
4	2	2	4	ост.	–	–	–	~100

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Как видно из рис. 1 – 3, оплавленная зона отличается по структуре от остальной части образ-

ца. При увеличении плотности мощности одного импульса зона оплавления сужается в диаметре и заметно углубляется (рис. 2).

Если плотность мощности импульсов лазера неизменна, то после нескольких импульсных лазерных воздействий в одну точку на осевом разрезе образцов можно зафиксировать необычную микроструктуру. По глубине зоны оплавления фиксируются четко выраженные границы, разделяющие зону оплавления на части. Количество этих частей соответствует количеству импульсов лазерного воздействия.

На рис. 1 видна наполовину расплавленная

ты вдоль направления градиента температуры.

При увеличении содержания алюминия в сплаве до 10 % частицы *K*-фазы имеют сферическую форму практически по всему объему оплавленной зоны (рис. 3б). Также на примере этого сплава хорошо видно, что границы первой оплавленной зоны имеют более изломанный вид, чем границы последующих оплавленных зон (рис. 3). В некоторых местах границы оплавленной зоны как бы окаймляют частицы *K*-фазы.

Для сплава Fe-4%Al-2%Mn-C также фиксируются границы последовательно расплавленных зон. Однако эти границы выражены менее четко,

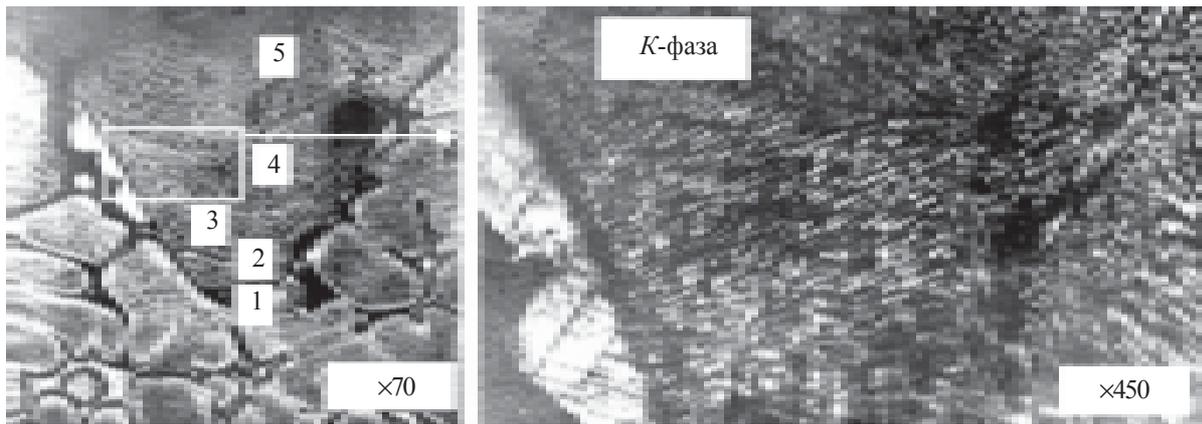


Рис. 1. Микроструктура осевого разреза образца сплава Fe-4%Al-2%C после пятикратного импульсного лазерного воздействия с оплавлением поверхности (10 Дж, 8 мс). 1 – 5 – последовательно расплавляемые зоны.

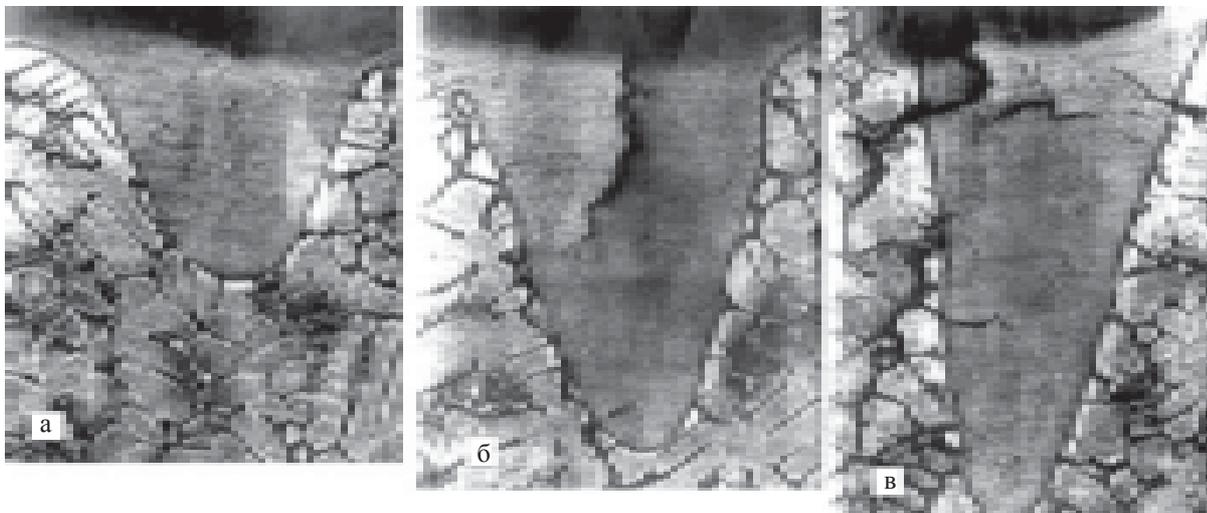


Рис. 2. Осевой разрез зоны оплавления после импульсного лазерного воздействия на поверхность образца сплава Fe-6%Al-2%C, $\times 70$: а – 10 Дж, 8 мс; б – 15 Дж, 8 мс; в – 20 Дж, 8 мс.

крупная карбидная частица *K*-фазы. Идентификация таких частиц на микрошлифах проводилась визуально. Эти частицы при данном химическом составе сплава и использовании определенного травителя (“царской водки”) травятся слабее, чем аустенит и мартенсит, и имеют более светлый оттенок на шлифе. Из рис. 1 видно, что *K*-фаза полностью не растворяется. Она измельчается, при этом измельченные частицы вытяну-

чем для сплавов Fe-Al-C (рис. 4) и расстояние между границами незначительно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Причину образования четко выраженных границ в зоне оплавления можно объяснить следующим образом. После первого импульса, благодаря восходящей диффузии, атомы углерода направленным кооперативным потоком движутся к

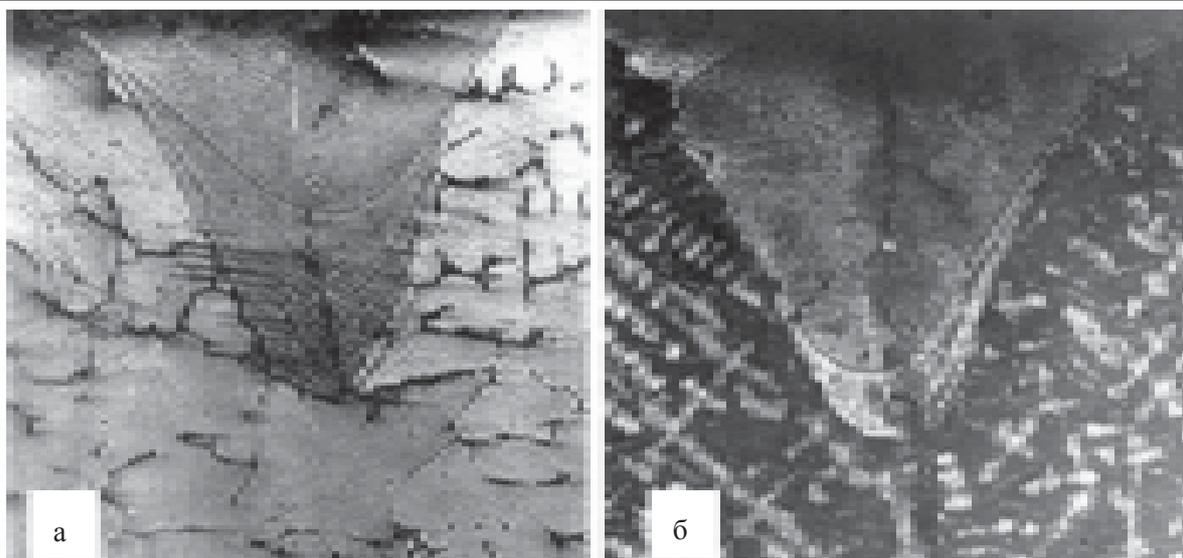


Рис. 3. Осевой разрез зоны оплавления после многократного импульсного лазерного воздействия на поверхность образцов сплавов (10 Дж, 8мс): а – Fe-6%Al-2%C – пять импульсов; б – Fe-10%Al-2%C – три импульса; $\times 70$.

обрабатываемой поверхности [3, 4]. По этой причине зона обогащается углеродом и, соответственно, ее теплопроводность понижается. Такая зона с пониженной теплопроводностью при последующем импульсе препятствует распространению температурного фронта вглубь металла, фиксируя фронт проплавления на некотором расстоянии от края первоначально оплавленной зоны, которая образовалась в результате предыдущего импульса. Каждый последующий импульс приводит к увеличению концентрации углерода в приповерхностном слое и к уменьшению его теплопроводности. Соответственно, расстояние между границами проплавления по глубине с каждым последующим импульсом возрастает.

расстоянии от нее по обе стороны. Это подтверждает факты, изложенные в работах [1, 2].

Отличие образования оплавленных зон при многократном лазерном облучении сплава Fe-4%Al-2%Mn-C обусловлено, очевидно, тем, что атомы марганца подавляют восходящую диффузию атомов углерода к обрабатываемой поверхности и такого увеличения концентрации углерода в расплавленной зоне как для сплавов Fe-Al-C не происходит. Последовательно расплавленные зоны мало отличаются одна от другой по теплопроводности и соответственно, по глубине (рис. 4).

Таким образом, в работе показано, что последовательное воздействие импульсов лазера на один и тот же участок поверхности сплавов

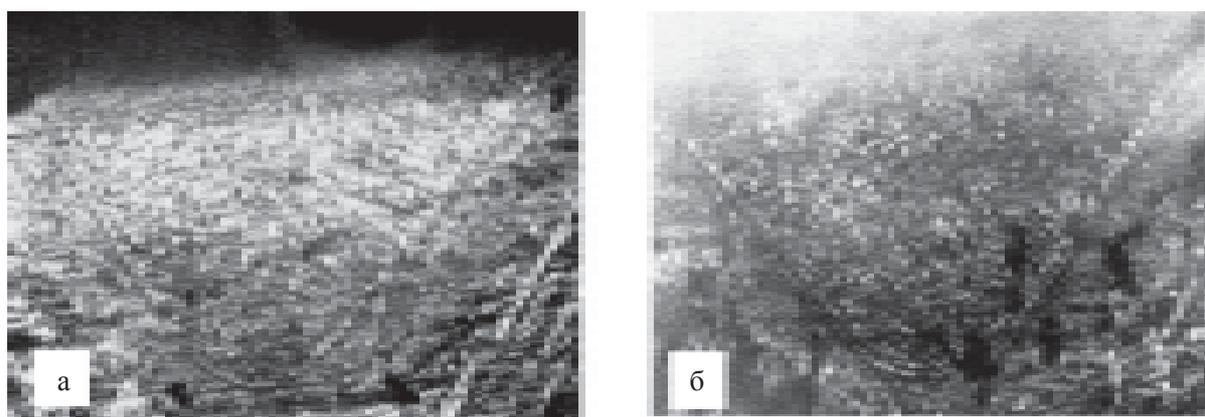


Рис. 4. Микроструктура оплавленной зоны и зоны термического влияния после многократного импульсного облучения образцов сплава Fe-4% Al-2% Mn-C, $\times 70$; а – 2 импульса, 15 Дж, б – 3 импульса, 15 Дж.

Из рис. 5 видно неоднородность распределения микротвердости возле границы, разделяющей части зоны оплавления. Микротвердость возле границы больше по величине, чем на некотором

Fe-Al-C приводит к эффекту разделения зоны оплавления на отдельные прослойки с разными химическими состояниями и свойствами. Этот эффект менее заметен в сплавах Fe-Al-Mn-C.

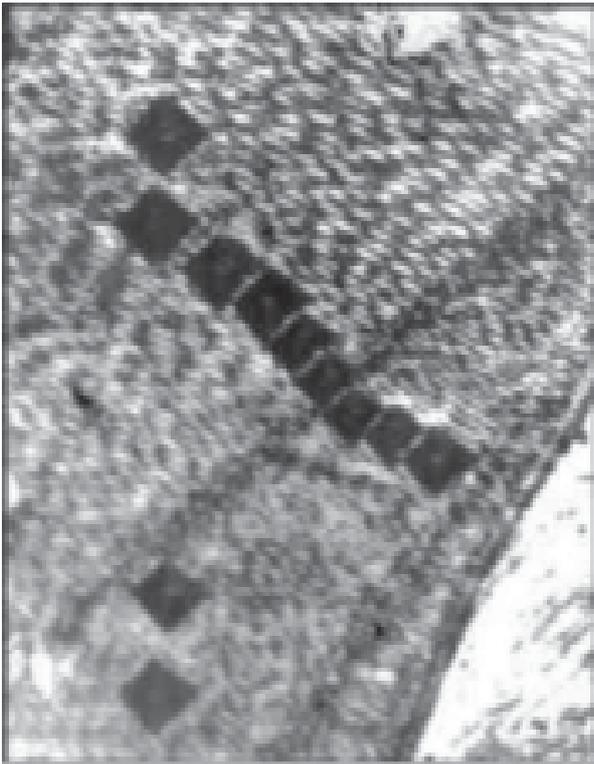


Рис. 5. Распределение микротвердости возле границы оплавленных зон после импульсного лазерного облучения с оплавлением поверхности, $\times 150$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменяя мощность и количество импульсов лазерного излучения, воздействующего на один и тот же участок поверхности сплавов, можно инициировать разделение оплавляемого объема на отдельные зоны оплавления, образование которых происходит вследствие восходящей диффузии атомов внедрения и изменения

МИКРОСТРУКТУРА ЗОНЫ ОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ БАГАТОКРАТНІЙ ІМПУЛЬСНІЙ ЛАЗЕРНІЙ ДІЇ

І.Є. Гнатюк, В.А. Андрищенко,
В.І. Бондарь, Є.Н. Дзевін

Досліджували вплив лазерних імпульсів ($E = 20$ Дж, $\tau = 0,8$ мс, $n \leq 5$) на одну і ту ж ділянку поверхні зразків сплавів Fe-Al-C і Fe-Al-Mn-C. Встановили, що при збільшенні кількості імпульсів до 5, наступні зони оплавлення зменшуються по відношенню до першопочатково розплавлених зон. При $1 < n \leq 5$ оплавлених об'єм розділяють межі, кількість яких відповідає кількості імпульсів. Зміну об'єму зон оплавлення пояснили зміною теплопровідності цих зон через висхідну дифузію вуглецю з глибини зразків до оброблюваної поверхні.

теплопроводности в зоне оплавления после каждого воздействия.

Дальнейшие исследования этого эффекта могут привести к разработке физических основ получения наперед заданных структур и свойств в прослойках оплавленной лазерным излучением зоны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нищенко М.М. Фазообразование и электронные свойства быстрозатвердевших сплавов в поверхностном слое после лазерного импульсного воздействия // Дисс. докт. физ.-мат. наук – ИМФ. – 1993. – 335 с.
2. Сафонов А.Н., Алексеенко С.И. Исследование структуры стали 40X10C2M после обработки поверхности CO₂-лазером непрерывного действия // МиТОМ. – 1996. – № 12. – С. 10-13.
3. Измайлов Е.А., Горбач В.Г. Направленное перемещение атомов углерода в сталях, стимулированное лазерным излучением // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 286. – № 2. – С. 348-351.
4. Андрищенко В.А., Дзевин Е.Н., Мазанко В.Ф., Свечников В.Л. Восходящая диффузия в приповерхностных слоях сплавов Fe-Al-C в процессе лазерного воздействия // Металлофизика и новейшие технологии. – 1999. – Т. 21, № 9. – С. 71-77.
5. Андрищенко В.А., Гнатюк И.Е., Дзевин Е.Н. Влияние импульсного лазерного воздействия на ориентации α -мартенсита в закаленных Fe-Al-C сплавах // Металлофизика и новейшие технологии. – 2001. – Т. 23, № 6. – С. 777-788.
6. Данильченко В.Е., Польчук Б.Б. Особенности микрорельефа поверхности технического железа в зоне воздействия излучения импульсного лазера // МиТОМ. – 2001. – № 2. – С. 15-17.

MICROSTRUCTURE OF MELTED ZONE AT MULTIPLIED LASER PULSES ACTION

I.Ye. Gnatyuk, V.A. Andriyushenko,
V.I. Bondar, Ye.N. Dzevin

The effect of laser pulses ($E = 20$ J, $t = 0,8$ ms, $n < 5$) on the same site of the surface of specimens of Fe-Al-C and Fe-Al-Mn-C alloys is studied. It was found that on increasing number of pulses up to 5, the subsequent melted zones decrease in relation to originally melted ones. For $1 < n < 5$ the melted volume is divided by boundaries, the number of which amount corresponds to the number of pulses. The change of zone volume is explained by the change in the thermal conduction of these zones due to the increased diffusion of carbon from the specimen bulk to a surface under processing.