

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В АМОРФНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СПЛАВЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ЛАЗЕРОМ

Пермякова И.Е.

ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина", Москва, Россия, inga_perm@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лазерная обработка является весьма востребованной и перспективной технологией модификации структуры и свойств материалов [1]. В частности, лазерное облучение активно используется применительно к аморфным металлическим сплавам (АМС), обладающим уникальным комплексом физико-механических характеристик, которые во многом превосходят свойства их кристаллических аналогов [2]. Аморфное состояние весьма чувствительно к вариациям температуры. На начальных стадиях нагрева в АМС происходят процессы структурной релаксации, а при высоких температурах – протекают процессы кристаллизации. В результате лазерной обработки возможно:

- 1) повышать термическую стабильность АМС, смещая интервал кристаллизации в сторону более высоких температур;
- 2) изменять порядок фазообразования и тип кристаллизации;
- 3) формировать двухслойные аморфно-кристаллические структуры (композиты);
- 4) влиять на доменную структуру, и тем самым, снижать магнитные потери;
- 5) повышать прочность и твердость АМС.

Для того чтобы гарантировано получить требуемые свойства и структурные состояния в АМС при лазерной обработке, необходимо иметь целостное представление о взаимодействии лазерного излучения (ЛИ) с исследуемым материалом, изучить влияние режимов облучения и его параметров (мощность, энергия импульсов, длительность воздействия и т.д.) на отклик свойств и превращения в структуре.

Действие ЛИ на непрозрачные среды (металлы, сплавы) удовлетворительно можно описать тепловой моделью. Стадия нагрева является основной при исследованиях, а также при анализе технологических процессов, происходящих без разрушения материала.

Цель настоящей работы – осуществить компьютерный расчет в среде Mathcad характеристик теплового поля АМС при лазерном нагреве и сопоставить результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

При расчете, для ввода параметров лазерной обработки и теплофизических характеристик использовали следующие данные:

- в качестве объекта исследования выбраны образцы ленты АМС $\text{Co}_{70,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_4\text{Si}_7\text{B}_{18}$ размером 1×1 см, толщиной 30 мкм, полученной методом закалки из расплава. По данным ДСК температура кристаллизации АМС $T_{\text{cryst}} = 550$ °С.
- облучение АМС производилось эксимерным ультрафиолетовым KrF лазером (Excimer laser CL-7100) с длиной волны 248 нм, длительностью импульса $\tau = 20$ нс. Количество импульсов варьировалось от 1 до 1000; энергия импульса составляла 150 мДж; плотность энергии – $0,6$ Дж/см²; частота следования задавалась 2 Гц.

Поглощение ЛИ твердым телом эквивалентно появлению источника тепла внутри или на поверхности материала. Его реакцию на действие источника можно найти, решая трехмерное уравнение теплопроводности:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + B(x, y, z, t) \quad (1)$$

ρ – плотность, λ – теплопроводность, C – удельная теплоемкость материала, T – температура, B – функция распределения источников, x, y, z , – декартова система координат, связанная с облученным телом, t – время [3].

Для выбора расчетной модели проведена теплофизическая оценка на основе анализа исходных данных [2]. Определена толщина h прогреваемого слоя, т.е. зоны термического влияния, на которую распространяется нагрев за 1 импульс, по приближенной формуле:

$$h = 2 \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}} \quad (2).$$

Эта толщина составляет 0,75 мкм. Поскольку расстояние, на которое распространяется тепловой фронт по поверхности или вглубь материала за время действия ЛИ значительно меньше радиуса фокального пятна и толщины ленты АМС ($h \ll r_n$), то в этом случае реализуется тепловая модель полубесконечного тела. Распределение интенсивности ЛИ по Гауссу позволяет, используя цилиндрическую симметрию источника ЛИ, получить точное решение тепловой двумерной задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате взаимодействия ЛИ на поверхность АМС в них происходят структурные изменения. Особенности этих изменений обусловлены характеристиками возникающего температурного поля, такими как максимально достигнутые температура и скорости нагрева/охлаждения, распределение их по глубине зоны лазерного воздействия и т.д.

Для приближенного вычисления максимальной температуры нагрева поверхности при одном импульсе в центре облученной области в виде круга радиусом r (с учетом условия импульсного режима $r \gg \sqrt{a\tau}$) использовали уравнение:

$$T = T_0 + 2qA \frac{\sqrt{a\tau}}{\lambda\sqrt{\pi}}, \quad (3)$$

где T_0 – начальная температура образца, q – плотность мощности ЛИ, A – коэффициент поверхностного поглощения ЛИ АМС [4]. Из уравнения (3) $T_{\max} = 489$ °С.

В рамках работы проведен численный расчет распределения температуры по Z – толщине АМС и R – радиусу пятна при малых дозах облучения (рис. 1 а). Видно, что температура в облученной зоне лежит в диапазоне от 100 до 500 °С, что соответствует протеканию интенсивных процессов структурной релаксации в АМС.

В ходе расчетов температурного поля при больших дозах облучения (большого числа импульсов N) следует учитывать следующее: лазер, работающий в импульсном режиме, генерирует серию импульсов длительность τ при частоте следования f , после окончания очередного импульса материал начинает остывать, и, если выполняется условие

$$f < \frac{a}{30r^2}, \quad (4)$$

то накопление тепла от импульса к импульсу не происходит [4]. В нашем случае условие (4) при $f = 2$ Гц не выполняется. Таким образом, нельзя полагать, что результат расчета температуры зависит лишь от энергетических параметров отдельного импульса. При облучении исследуемого АМС постепенно идет накопление тепла от импульса к импульсу и проникновение нагрева вглубь.

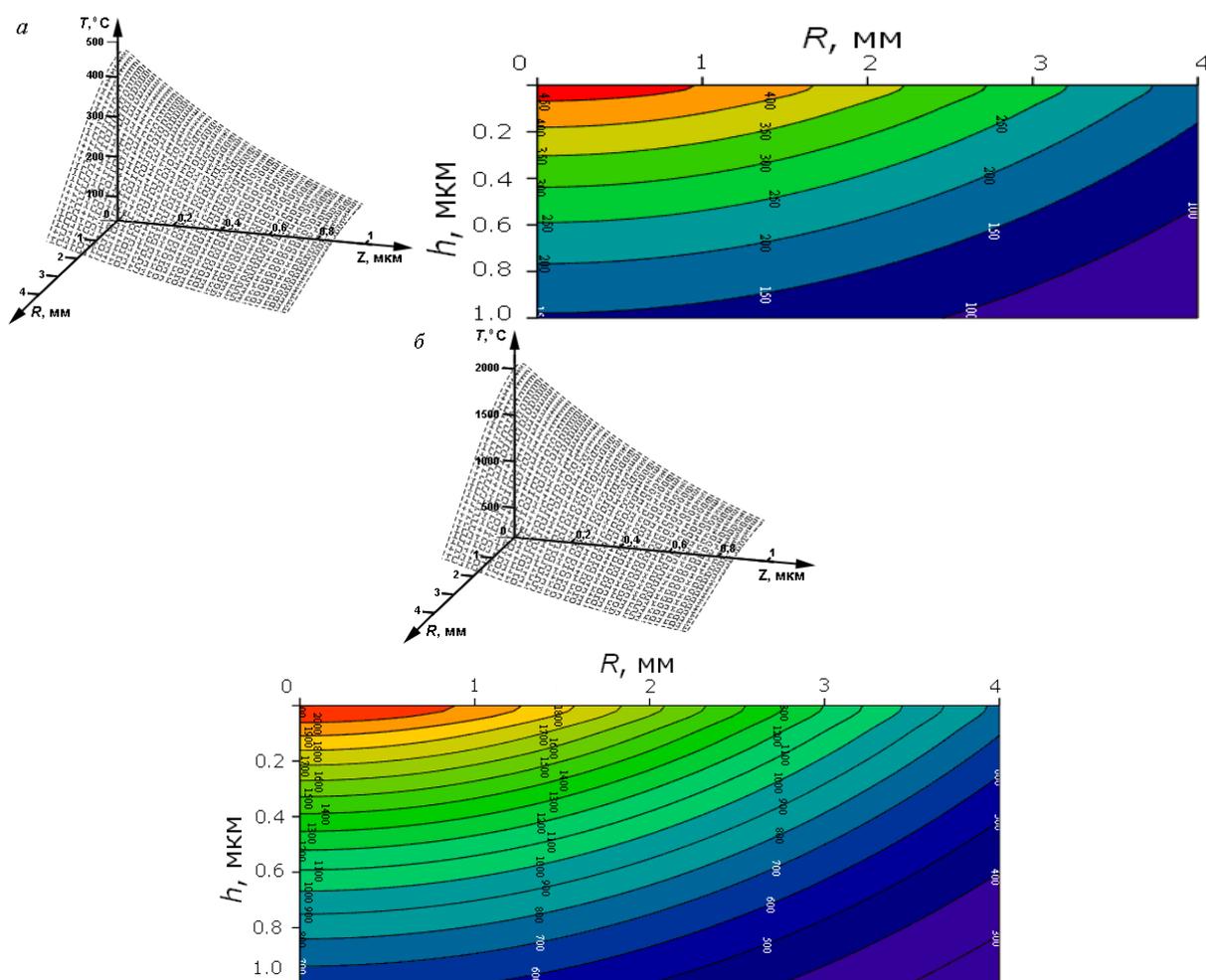


Рисунок 1 - Температурное поле в АМС, изотермы при 20 (а) и 900 импульсов (б).

Можно заключить, что со значительным увеличением N (от 300 импульсов и выше) в расчетах должна быть смена тепловой модели полубесконечного тела на модель для тонкой пластины. С учетом этого в результате моделирования получено, что при больших дозах облучения на поверхности достигаются плавильные температуры и температуры кристаллизации АМС (рис. 1 б).

Численный расчет показал сверхвысокие значения скоростей нагрева и охлаждения ($1 \times 10^{10} \text{ K/c} < \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial t} < 3 \times 10^{10} \text{ K/c}$ и $-1,5 \times 10^9 \text{ K/c} < \frac{\partial T(0, 3\tau)}{\partial t} < -5 \times 10^8 \text{ K/c}$, соответственно) АМС (рис. 2). Такие скорости являются характерной чертой лазерной заковки [5], которую можно использовать для поверхностного термоупрочнения АМС, как это сделано в более ранней работе [6]: при лазерном облучении АМС $\text{Co}_{70,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Cr}_4\text{Si}_7\text{B}_{18}$ удалось добиться двухстадийного увеличения микротвердости на 20 %.

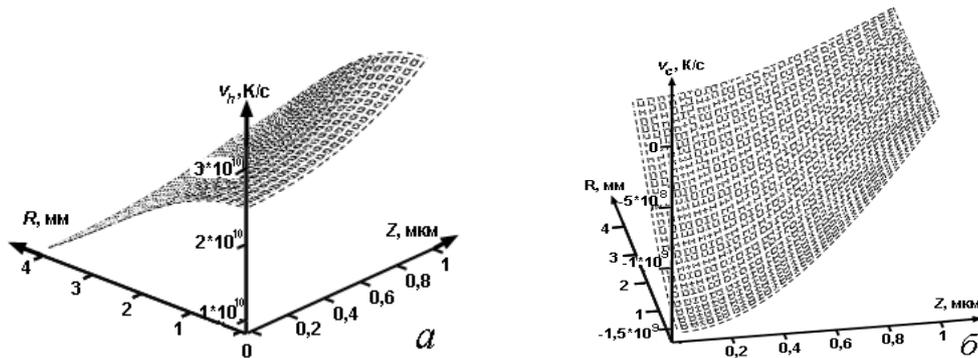


Рисунок 2 - Скорость нагрева (а) и охлаждения в момент времени $t = 3\tau$ (б).

Обратимся теперь к металлографическим исследованиям по наблюдению видоизменений рельефа и морфологии поверхности АМС после ЛИ, на основании которых установлено, что

– при малом количестве импульсов на облучаемой поверхности АМС нет визуальных следов термического воздействия;

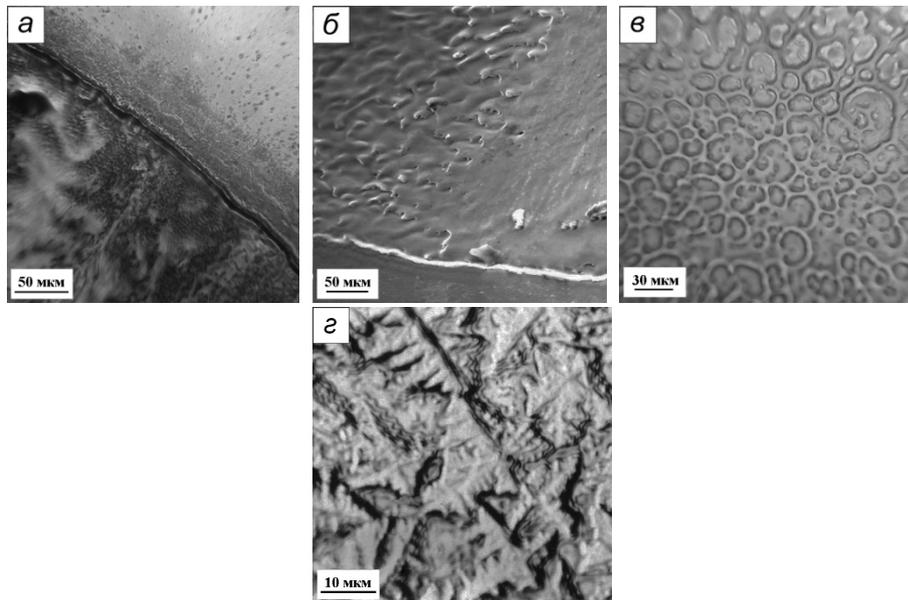


Рисунок 3 - Изменение морфологии поверхностного слоя АМС, подвергнутого лазерной обработке при различной дозе облучения.

– при 400-800 импульсов появляются цвета побежалости (рис. 3 а), что является уже результатом нагрева верхнего слоя образцов, соответствующим температурам от $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $830\text{ }^{\circ}\text{C}$, если сопоставлять с цветами побежалости, наблюдаемые при обычном печном отжиге.

– свыше 800 импульсов появляются «индикаторы» значительного разогрева АМС, т.е. структуры поверхностного слоя, образованные после локального оплавления образцов, а именно брызги и лунки (рис. 3 б, в), а также участки с дендритами (рис. 3 г).

Таким образом, сопоставляя эти экспериментальные данные с результатами численного моделирования температурных полей, можно заключить удовлетворительное их согласование и соответствие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные помогут более целенаправленно использовать лазерное воздействие при изготовлении композитов из АМС с необходимым составом структурных единиц и структурных параметров: выбирать основные характеристики лазерной установки (например, энергию, мощность, длительность импульса), осуществлять поиск оптимальных и альтернативных режимов её эксплуатации для необходимого лазерного технологического процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-02-00402"А").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
- [2]. Solodov A., Ochkov V. Differential models. An Introduction with Mathcad. – Berlin. Heidelberg. New York. Springer. 2004. – 232 p.
- [3]. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 504 с.
- [4]. Вейко В.П., Шахно Е.А. Сборник задач по лазерным технологиям. Изд. 3-е испр. и дополн. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 67 с.
- [5]. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
- [6]. Пермякова И.Е., Глезер А.М., Иванов А.А., Шеляков А.В. Применение лазерного дизайна аморфных сплавов на основе железа и кобальта для создания аморфно – кристаллических композитов // Известия Высших Учебных Заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 9. С. 115-122.