

## **АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ**

*И.И. Антропов*

Проведен анализ процессов, протекающих в поверхностном слое металлов при неразрушающей высокоэнергетической обработке. Приведены результаты реализации самосогласованной схемы расчета температурного поля и их сравнение с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: лазерная обработка, самосогласованный расчет, закалка, фазовый состав.

### **Введение**

Повышение износостойкости и других эксплуатационных характеристик изделий является на сегодняшний день одной из задач, сохраняющих свою актуальность. Разработка новых методов высокоэнергетической обработки позволяет значительно снизить стоимость технологии модификации материалов по сравнению с традиционными методами при обеспечении повышенных характеристик. Этим обеспечивается значительная экономия материалов и энергетических ресурсов, как на этапе изготовления деталей, так и при их ремонте и восстановлении. При эксплуатации наиболее подвержен механическим и химическим нагрузкам поверхностный слой деталей, поэтому повышение его износостойкости является основной задачей при любом виде обработки.

Наиболее важным критерием, по которому делается выбор того или иного метода поверхностной модификации, является, как правило, обеспечение повышенной твердости за счет измельчения структуры. Однако поверхностные фазовые переходы сопровождаются рядом дополнительных эффектов, которые в комплексе могут как повысить, так и снизить время эксплуатации детали. В частности, изменение фазового состава неотъемлемо вызывает изменение реакционных характеристик поверхности, которые напрямую связаны с энергетическим состоянием поверхностного слоя. Кроме того, после обработки в поверхностном слое возникают знакопеременные механические напряжения, модуль изменения которых достигает значений до 600 МПа на достаточно малых (до 1 мм) протяженностях [1].

Использование высококонцентрированных поверхностных энергетических источников энергии является на сегодняшний день одним из наиболее

перспективных методов поверхностной обработки. Высокие скорости нагрева и охлаждения позволяют эффективно модифицировать микроструктуру поверхности. Инициировать процесс фазовой перестройки можно несколькими способами. Наиболее распространенными нетрадиционными методами являются использование плазмы, лазерного излучения или их комбинация. В зависимости от выбранного метода, возможна реализация обработки в непрерывном или импульсном режиме. Тепловые процессы при использовании различных источников подобны, причем наибольшая нестационарность процессов свойственна случаю лазерной поверхностной обработке. Это связано с тем, что закономерности протекания фазовых превращений при интенсивном тепловом воздействии существенно отличаются от превращений, сопровождающих традиционные методы обработки [2], что выражается, прежде всего, в смещении точек  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращений в условиях интенсивного нагрева.

### **Анализ процессов в поверхностном слое металлов при высокоэнергетической обработке**

Рассмотрим процессы, сопровождающие лазерную поверхностную обработку. Механизм взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металлов достаточно сложен и связан с действием ряда факторов, наиболее существенными из которых являются время воздействия ( $\delta t$ ), временная форма лазерного импульса и плотность мощности на поверхности материала ( $q$ ). Известно несколько режимов лазерного воздействия, имеющих особый характер. Первым из них (по интенсивности) является режим аномального рассеивания [3], который наблюдается при  $\delta t \sim 10^{-8}$  с и  $10^3 < q < 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. Второй режим – чистого испарения (без прохождения через жидкую фазу) реализуется [4] при  $\delta t \sim 10^{-8}$  с и  $10^8 < q < 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. При дальнейшем увеличении интенсивности свыше  $q > 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> происходит переход к ударно-волновому воздействию [5]. Увеличение длительности импульса при тех же значениях плотности мощности приводит к интенсивному выгоранию материала уже при  $\delta t \sim 10^{-7}$  с и  $q \sim 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

В металлах кванты излучения поглощаются электронами проводимости в слое толщиной  $10^{-6} \dots 10^{-5}$  см, что соответствует глубине проникновения излучения в материал. Энергия электронов проводимости возрастает, повышается температура электронного газа, которая постепенно выравнивается. Температура решетки вследствие отличия масс электронов и ионных остовов в течении некоторого времени сохраняется. Начиная с определенного момента времени, усиливается электрон-фононное взаимодействие, результатом которого является снижение температуры электронного газа и повышение температуры решетки. В течение около  $10^{-11}$  с температуры электронного газа и кристаллической решетки выравниваются и тепловые процессы можно охарактеризовать совместной температурой.

Кроме того, известно, что при интенсивностях излучения  $q \sim 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> для коротких импульсов и  $q \sim 10^5$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> для импульсов длительностью от миллисекундной и более возникает приповерхностная плазма. Плазма существенно влияет на характер взаимодействия излучения с веществом. Это проявляется в том, что она сама частично или полностью поглощает лазерное излучение и тем самым изменяет его часть, которая попадает на обрабатываемую поверхность. С другой стороны, плазма выступает в роли буферного преобразователя энергии, поскольку сама начинает эффективно нагревать поверхность материала. Таким образом, при длительностях, характерных для неразрушающей лазерной обработки металлов, процессы в поверхностном слое могут рассматриваться в классической термодинамической постановке. При характерной для данного типа обработки цилиндрической симметрии постановка задачи лазерного нагрева имеет вид

$$\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} T(r, z, t) = \frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, z, t) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} T(r, z, t) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} T(r, z, t), \quad (1)$$

с граничными и начальными условиями

$$T(r, z, 0) = 0; \quad T(\infty, \infty, t) = 0; \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q_0 \cdot \varphi(r, z) \tau(t), \quad (2)$$

где  $a$ ,  $\lambda$  – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, изменяющиеся нелинейно,  $q(r, z, t) = q_0 \cdot \varphi(r, z) \tau(t)$  – эффективный распределенный тепловой источник.

В инфракрасной и видимой области оптического диапазона металлы достаточно хорошо отражают электромагнитное излучение. Это вызвано рассеянием света на свободных электронах, концентрация которых в металлах составляет  $10^{22}$ – $10^{23}$  см<sup>-3</sup>. В общем случае, можно выделить следующие механизмы поглощения [6]:

$$A = A_{\text{внутр}} + A_{\text{внеш}} = A_{\text{Д}} + A_{\text{А}} + A_{\text{МЗ}} + A_{\text{ш}} + A_{\text{окс}} + A_{\text{деф}}, \quad (3)$$

где  $A_{\text{внутр}}$  – поглощение, обусловленное внутренними свойствами металла и состоит из нормального (по модели Друде) и аномального скин-эффекта, а также межзонными переходами;

$A_{\text{внеш}}$  – функция, обусловленная внешними (поверхностными) эффектами и включает в себя шероховатость поверхности, оксиды, включения и дефекты. Поведение коэффициента поглощения при высокоэнергетическом воздействии достаточно нелинейно и существенно зависит от пространственного и временного распределения плотности мощности. Однако, при рассмотрении задачи нагрева с учетом образования приповерхностной плазмы можно для длительного по времени нормально распределенного эффективного теплового источника, действующего в течение времени  $0 \leq t \leq \tau$  с последующим выключением, записать решение (1) в виде:

$$T(r, z, t) = \begin{cases} \frac{2\langle q \rangle e^{-kr^2} \sqrt{at}}{\lambda} \Phi^* \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) & \text{при } 0 \leq t \leq \tau, \\ \frac{2\langle q \rangle e^{-kr^2} \sqrt{a}}{\lambda} \left( \sqrt{t} \Phi^* \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) - \sqrt{t-\tau} \Phi^* \left( \frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right) \right) & \text{при } t > \tau, \end{cases} \quad (3a)$$

где  $\Phi^*(\xi)$  – дополнение к интегралу вероятности,  $k$  – коэффициент пространственного сжатия,  $\langle q \rangle$  – максимальное значение плотности эффективного теплового источника.

Учет нелинейности теплофизических параметров можно обеспечить использованием самосогласованного алгоритма расчета теплового фронта, при котором значение параметров определяются на предыдущем шаге определения температуры.

### Результаты и их обсуждение

Обработке подвергались образцы, изготовленные из углеродистых и низколегированных сталей нескольких марок. Обработка проводилась в импульсном режиме по схеме без перекрытия зон теплового воздействия. Результаты исследования структуры и морфологических характеристик поверхности сравнивались с результатами моделирования процессов. Рассчитанные распределения температур для пятна обработки образца из стали ст45 приведены на рис. 1. Условия обработки: время облучения 3 мс, эффективная энергия излучения в импульсе 1,5 Дж, диаметр пятна излучения на поверхности материала 1 мм. Энергетические параметры излучения определялись по стандартным методикам, распределение интенсивности по апертуре близкое к нормальному.

Анализ результатов расчета для различных глубин показывает, что температура достигает начала аустенитного превращения за десятые доли миллисекунд для поверхности материала и около 1,2 мс на глубине 100 мкм; распад аустенита на этих глубина начинается практически одновременно через 7 мс после начала облучения. Таким образом, время выдержки при

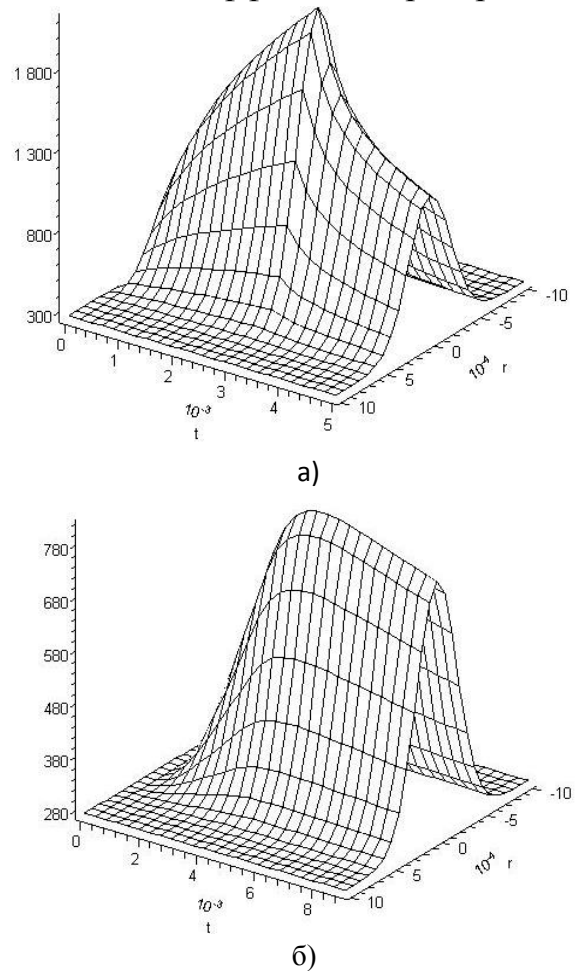


Рис. 1. Изменение температуры металла (сталь 45) со временем при действии лазерным излучением:  
а) на поверхности,  
б) на глубине 250 мкм

температуре выше точки аустенитного превращения составляет около 5,5–7 мс, что достаточно для получения при дальнейшем охлаждении мелкодисперсной структуры.

Типичные микроструктуры, получаемые при лазерных скоростях нагрева углеродистых сталей, показаны на рис. 2. Характерной особенностью высокоскоростного фазового превращения является наличие границ зерен, характерных для исходной равновесной структуры. Протяженность переходных участков между областями с различным фазовым составом является функцией концентрации углерода в исходной матрице. Для низкоуглеродистых сталей характерны неравномерное распределение углерода по пятну обработки и снижение градиента концентрации неоднородности внутри пятна по сравнению с его значением снаружи пятна. Это объясняется тем, что процесс возникновения и роста новой фазы связан не только с установлением неравномерной концентрации примесей, но и стимулирует вынесение на периферию зоны обработки дислокаций. Можно отметить, что внутри зоны обработки также может наблюдаться увеличение концентрации неоднородностей. Как правило, это возникает при каком-либо повреждении обрабатываемой поверхности.

Область обработки на поверхности можно условно разделить на три зоны. Автозакаленная (до 200 мкм) после окончания действия лазерного импульса находится в жидком состоянии и вследствие интенсивного (порядка  $10^6$  К/с) теплоотвода в ней происходит направленная кристаллизация и образуется дендритная структура. Во второй зоне (до 350 мкм) не происходит оплавления и происходит полная рекристаллизация с измельчением

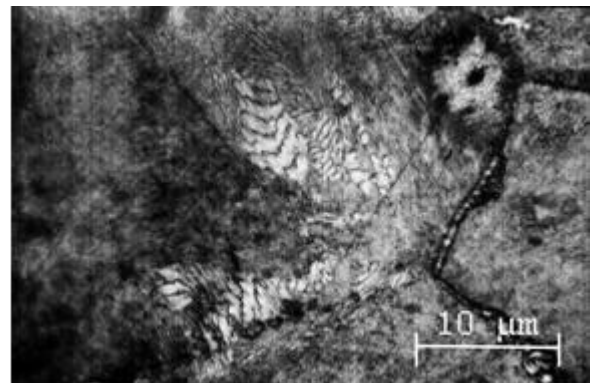
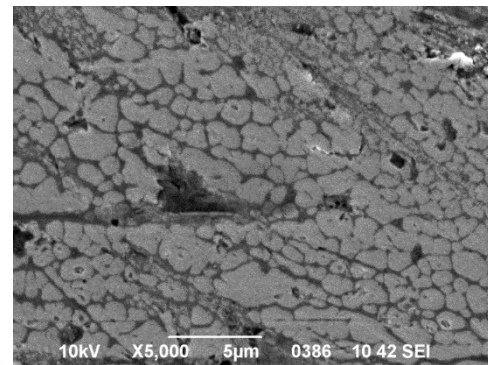
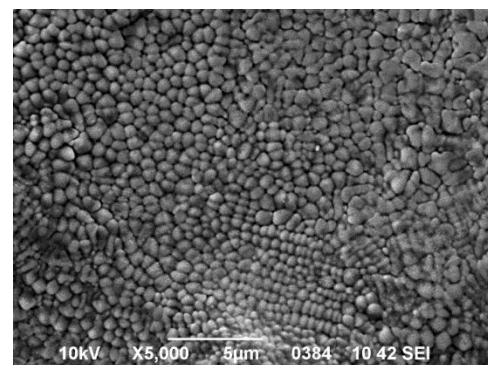


Рис. 2. Микроструктура поверхности стали 40X после лазерной обработки, x1000



а)



б)

Рис. 3. Поверхность образца из ст45: необработанный (а) и обработанный (б) участки

зерна. В третьей области, где температура, достаточная для проведения полной закалки, не достигается, возможны два варианта протекания процессов: частичная закалка за счет переохлаждения зерен аустенита и перераспределение дефектов в пределах зоны обработки.

Глубина зоны структурных преобразований может быть определена на основании (3) по распределению температуры. Полученные оценки достаточно совпадают с результатами металлографического анализа поперечных микрошлифов с точностью до 10 %.

Необходимо также отметить, что локальная поверхностная обработка также сопровождается переплавкой тонкого поверхностного слоя. На рис. 3 приведено SEI-изображение центральной части зоны обработки на поверхности образца из ст45 до и после реализации лазерного упрочнения. В обработанных участках наблюдается образование достаточно упорядоченной глобулярной структуры с характерными размерами до 200 нм.

Таким образом, описанная математическая модель лазерного поверхностного нагрева достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований и может быть использована при определении режимов лазерной поверхностной закалки по требуемым параметрам зоны обработки. Для уточнения описанной модели возможно введение в (1) и (2) членов, учитывающих фазовые превращения и радиационные потери.

#### Библиографический список

1. Mor, G.P. Residual stresses measurements by means of x-ray diffraction on electron beam welded joints and laser hardened surfaces / G.P. Mor, R. Pezzoni // Proceedings of the 2nd International Conference on Residual Stresses "ICRS2"; ed. by G. Beck, S. Denis, A. Simon. – London: Nancy, Elsevier Applied Science. 1988. Pp. 696–702.
2. Бертяев, Б.И. О механизме  $\alpha \rightarrow \gamma$  – превращения в Fe и углеродистой стали / Б.И. Бертяев // Вестн. Самарского гос. тех. ун-та. Серия физ.-мат. науки. – 2004. – № 26. – С. 151–158.
3. Анисимов, С.И. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Я.Р. Имас, Ю.В. Хадыко. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
4. Иванов, А.Ю. Испарительный режим лазерного воздействия на поверхность / А.Ю. Иванов, Г.Е. Скворцов // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, Вып. 15. – С. 65–71.
5. Анисимов, С.И. Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях / С.И. Анисимов, А.М. Прохоров, В.Е. Фортон // УФН. – 1984. – Т. 142, № 3. – С. 395–434.
6. Laser heating of metals / A.M. Prokhorov, V.I. Konov, I. Ursu, N. Mihailescu. – Taylor & Francis. – 1990. – 240 p.

[К содержанию](#)