

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Назаренко Любовь Олеговна

**Исследование процессов поверхностного энергомассопереноса при
воздействии лазерного излучения на стали**

Направление подготовки 22.04.01 - «Материаловедение и технология
материалов»

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

Профессор,
Доктор технических наук,
Ким Владимир Алексеевич

Защита состоится «__30__» июня 2020 года в ____ часов ____ мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд.

Автореферат разослан _____ 2020 г.

Секретарь ГЭК

Белова Инна Валерьевна

Лазерное излучение относится к высококонцентрированному потоку энергии. Структурные изменения в результате взаимодействия лазерного излучения с материалами протекает в неравновесных условиях на фоне высоких температур и их градиентов, скоростей нагрева и охлаждения. Такие термические условия далеки от условий стандартной термической обработки, поэтому процессы структурообразования при лазерной обработке материалов носят согласованный характер, развитие которого осуществляется по синергетическому алгоритму. Результатом этого процесса является образование диссипативных структур, которые создают на микро- и мезомасштабном уровне каналы повышенной проводимости энергомассопереноса. Принципиальные закономерности этого процесса достаточно хорошо исследованы и представлены в обширной литературе. Тем не менее, имеется ряд нерешенных задач, актуальность которых сохраняется. К ним относят вопросы количественное описание неравновесных диссипативных поверхностных структур, возникающих в неравновесных условиях взаимодействия материалов с высококонцентрированными потоками энергии и вещества, и использование полученных закономерностей для селективного управления процессами лазерных технологий.

Изображения микроструктур с формальной точки зрения представляют совокупность геометрических фигур, объединенных в множества с определенной упорядоченностью, по которым визуально можно идентифицировать различные структурные составляющие и их модификации. Современные средства обработки изображений позволяют преобразовывать цифровые фотографии микроструктур и цветовые оттенки их отдельных составляющих в числовые массивы, используя которые можно создавать количественные показатели и комплексы, характеризующих структурную организацию материала и динамику структурных изменений.

В работе анализируются тепловые процессы, возникающие в материале под действием лазерного излучения. Важность этих процессов объясняется

тем, что они определяют характер структурных изменений и физико-механических свойств формирования структур.

Целью дипломной работы является исследование процессов поверхностного энерго-массопереноса при воздействии лазерного излучения на стали. Достижение указанной цели осуществлялось посредством решения следующих основных задач:

1. Анализ состояния исследуемого вопроса.
2. Разработать методику исследования.
3. Обработать результаты исследования.

Научная новизна: Выполнен анализ структурных превращений при лазерном упрочнении и локальном легировании.

Объект и предмет исследования

Объектами исследований является конструкционная сталь 45, инструментальная сталь У10, железо-армко, конструкционная сталь 25ХНМ. Предметом исследования является анализ физико-механических свойств материала, а также структурных изменений генерируемых импульсной лазерной обработкой.

Методы исследования

Выполнение научных исследований проводилось на основе экспериментов с использованием методов лазерной импульсной обработки материалов, а так же результатов металлографического анализа.

Новизна полученных результатов

Научная новизна заключается в использовании метода цветовой сегментации которая позволяет разделять структурные составляющие по степени их химической активности при травлении металлографического шлифа, таким образом появляется возможность проанализировать структуру материала с помощью новых количественных показателей структурной организации материала.

Достоверность и обоснованность результатов исследования

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых, взаимодополняющих методов исследования, большим объемом непротиворечивых экспериментальных данных, согласованность сданными теоретических исследований. Анализ экспериментальных данных проведен с соблюдением критериев достоверности измерений.

Личный вклад автора

Представленные в работе результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Анализ литературных источников, экспериментальные исследования, а также обработка и анализ результатов экспериментов выполнены лично автором. Электронно-микроскопические исследования, лазерная обработка, компьютерная металлография и методы металлографического анализа проведены автором. Постановка задач исследований и обсуждение результатов проведено при непосредственном участии автора совместно с научным руководителем.

Основные положения выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты работы:

1. Исследование структурных превращений при лазерной обработке стали 45.
2. Исследование полученных результатов.
3. Выводы по результатам проведенных исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы и определены основные направления исследования.

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературных источников касающихся структурных механизмов при лазерной обработки конструкционных и инструментальных сталей.

Во **второй главе** приведено описание материала и методик исследования.

В качестве эталонного материала использовалась сталь 45 для изучения отдельных механизмов упрочнения. Такой выбор обосновывается тем, что является одним из наиболее востребованных материалов, используемых во многих отраслях: производственные нужды, промышленность, строительство, машино- и приборостроение и прочее.

Благодаря исключительным свойствам этой стали, изделия из нее могут выдерживать значительные перепады температурных режимов и различные неблагоприятные климатические условия.

Сталь 45 является относительно дешёвым металлом, что позволяет производить из неё и цепные приводные звёздочки. После соответствующей термообработки звёздочки для цепей ПР-25,4, ПР-31,75, ПР-38,1, ПР-44,45 и ПР-50,8 обеспечивают долгую работоспособность цепного привода. Химический состав стали 45 приведен в таблице 1.

Механические свойства стали 45 приведены в таблице 2. Физические свойства стали 45 приведены в таблице 3.

Таблица 1 - Химический состав стали 45 В процентах

Марка	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Сталь 45	0.42 - 0.5	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	До 0.25	До 0.04	До 0.035	До 0.25	До 0.25	До 0.08

Таблица 2 - Механические свойства стали 45

Сортамент	Размер, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	ψ , %	КСУ, кДж/м ²	Термообработка
Лист горячекатан.	80	590				Состояние поставки
Полоса горячекатан.	6 - 25	600		40		Состояние поставки
Поковки	100 - 300	470	245	42	390	Нормализация
Поковки	300 - 500	470	245	35	340	Нормализация
Поковки	500 - 800	470	245	30	340	Нормализация

Примечание: σ_B - предел прочности, МПа; σ_T - предел текучести, МПа; ψ - относительное сужение, %; КСУ - ударная вязкость, кДж/м².

Таблица 3 - Физические свойства стали 45

T, град	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	λ , Вт/ (м * град)	ρ , кг/м ³
20	2		7826
100	2.01	48	7799
200	1.93	47	7769
300	1.9	44	7735
400	1.72	41	7698
500		39	7662
600		36	7625
700		31	7587
800		27	7595
900		26	

Примечание: E - модуль упругости, МПа; λ – теплопроводность, Вт/ (м * град); ρ – плотность, кг/м³.

Лазерная обработка производилась на лазерной установке LRS -300 (рисунок 1).



Рисунок 1 - Лазерная установка LRS -300

Для каждого материала были подобраны оптимальные режимы лазерной обработки, таблица 4.

Таблица 4 - Режимы лазерной обработки Стали 45

Режим	U, В	W, Дж/см	d, см	t, мс	E, Дж	$W \cdot 10^9, \text{Вт/см}^2$	f, Гц	P, Вт
1	450	168,7898089	0,2	2,5	5,3	1,688E+05	5	5300
2	450	350,3184713	0,2	2,5	11	1,752E+05	5	5500
3	450	477,7070064	0,2	2,5	15	1,911E+05	5	6000
4	450	573,2484076	0,2	2,5	18	1,911E+05	5	6000

В **третьей** главе представлены результаты исследований.

Тепловой источник, образующийся в металле при поглощении излучения оптических квантовых генераторов (ОКГ), работающего в режиме свободной генерации, можно считать поверхностным. Для практических оценок можно использовать тепловой источник с равномерным распределением мощности по пятну нагрева, поскольку разница в расчетных значениях температуры обычно не превышает 10 %. Будем считать, что теплофизические постоянные материала не зависят от температуры, т. е. уравнение теплопроводности примем линейным. Это допущение в случае

железных сплавов оправдано, так как для них α мало изменяется с температурой. Отражение части падающего излучения от поверхности считаем не зависящим от температуры. Поглощенную часть излучения можно определить с помощью коэффициента отражения. Не учитываем пиковую структуру импульса излучения ОКГ. При этих условиях изменения температуры в зоне воздействия излучения на металл, являющийся полубесконечной средой.

Распределение температуры по глубине прогретого слоя можно определить:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial z} = -\frac{q_s}{\lambda} \cdot \operatorname{erfc} \frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}$$

где $\frac{\partial T(z, t)}{\partial z}$ - дифференцированное выражение распределения температуры по глубине прогретого слоя;

q_s – плотность мощности источников тепла на поверхности, связанная с плотностью падающего светового потока, Вт/см²;

λ - коэффициент теплопроводности металла, Вт/(см · °С);

z – расстояние по вертикали от центра светового пятна в глубь металла перпендикулярно поверхности, м;

a – коэффициент температуропроводности металла, см²/с;

τ – длительность импульса, с.

Используя приведенные параметры излучения ОКГ и материала (сталь 45), получаем на поверхности $z = 0$ см, $\frac{\partial T}{\partial z} = -5,4 \cdot 10^5$ град/см, а на глубине $z = 5 \cdot 10^{-3}$ см, $\frac{\partial T}{\partial z} = -2,5 \cdot 10^5$ град/см; $z = 7,5 \cdot 10^{-3}$ см, $\frac{\partial T}{\partial z} = -1,6 \cdot 10^5$ град/см; $z = 10^{-2}$ см, $\frac{\partial T}{\partial z} = -0,9 \cdot 10^5$ град/см; $z = 1,2 \cdot 10^{-2}$ см, $\frac{\partial T}{\partial z} = -0,6 \cdot 10^5$ град/см; $z = 1,5 \cdot 10^{-2}$ см, $\frac{\partial T}{\partial z} = -0,16 \cdot 10^5$ град/см; $z = 1,7 \cdot 10^{-2}$ см, $\frac{\partial T}{\partial z} = -0,12 \cdot 10^5$ град/см; $z = 2 \cdot 10^{-2}$ см, $\frac{\partial T}{\partial z} = -0,1 \cdot 10^5$ град/см (при $\tau = 2,5$ мсек).

На рисунке 2 приведена зависимость $\frac{\partial T}{\partial z}$ от z при фиксированных значениях t . Видно, что одинаковые значения градиента температуры по глубине при больших t (но не превосходящих длительность импульса) охватывают большие z , чем при меньших t .

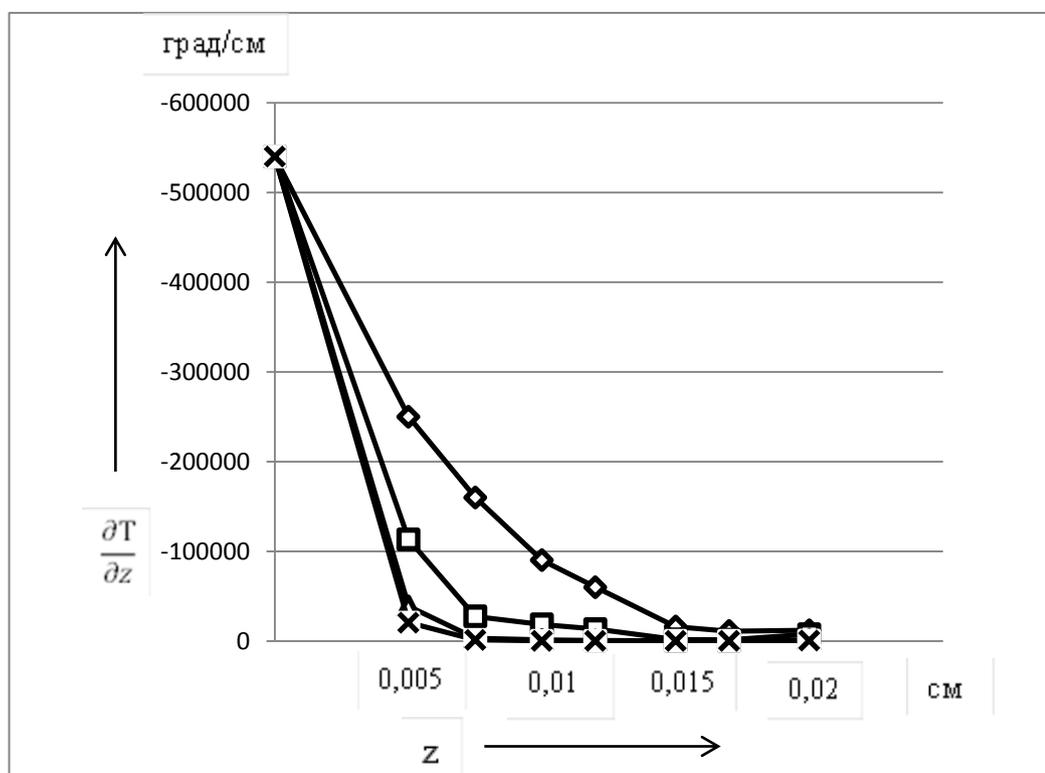


Рисунок 2 – Распределение градиента температуры по глубине при нагреве стали 45 излучением ОКГ без существенного разрушения поверхности:
1 – 1 мсек; 2 – 1,5 мсек; 3 – 2,5 мсек

Энергия, поглощённая в слое металла идет на его нагрев и передается теплопроводностью вглубь материала. Кинетика этого процесса описывается уравнением теплопроводности. При достижении на поверхности облучаемого металла некоторой температурной границы нагревания наступает термодеструкция исходной структуры металла и его разрушение. Для непрерывного лазерного излучения начало разрушения металла часто связано с нагревом до температуры плавления $T_{пл}$.

При длительном воздействии мощного лазерного излучения на определенные металлы устанавливается баланс между притоком лазерной энергии и стоками энергии на тепловое излучение нагретого пятна

воздействия и всего образца, термохимическое разрушение материала, теплопроводность, конвективное охлаждение.

Градиент температур определяет активность диффузионного процесса. В зависимости от влияния температуры на материал можно прогнозировать диффузию элементов, чем выше градиент, тем больше диффузия. Градиент температур влияет на перемещение дефектов.

Процессы, которые происходят при лазерной обработке очень похожи на процессы, которые протекают при термообработке, но при лазерной обработке они происходят быстрее и в не завершенном виде, потому что скорость нагрева и охлаждения высокая и, когда одна фаза выделяется, то она полностью не формируется и завершается, в итоге получается неравновесная структура.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Лазерная обработка характеризуется высокой скоростью нагрева и охлаждения, что на несколько порядков превышает стандарты термообработки.

2 Показана динамика развития температурных полей при лазерной обработке материалов и кинетика развития изотермы фазовых переходов.

3 Применение стали 45 при исследовании лазерной обработки позволяет в более чистом виде выявлять особенности развития дефектов кристаллического строения, инициированного мощными тепловыми импульсами.

4 Лазерная обработка повышает плотность микроструктурных объектов и удельную длину границ, при этом с их ростом проявляется тенденция увеличения микротвердости.