

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБРАЗЦЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг-6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ПЯТНА И ОБДУВА

*К. Р. Мансуров, А. В. Авдошин, О. Е. Авдошина, В. В. Кокшаров, В. А. Мазанов,
Е. Н. Макейкин, С. В. Маркин, А. С. Мелехин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Взаимодействие лазерного излучения (ЛИ) с материалами – одно из важнейших направлений в современной оптике и лазерной физике. Это направление позволило существенным образом дополнить представления о фундаментальных фотофизических процессах, происходящих в веществе при воздействии интенсивных световых потоков различных длительностей и длин волн. Обширные исследования в данной сфере позволили разработать физические основы многочисленных прикладных направлений, связанных с лазерами и их применениями в технологии. Знание основных механизмов и закономерностей воздействия лазерного излучения на материалы необходимо для определения различных оптических свойств. Это стимулирует проведение специальных и систематизированных исследований материалов, которые выбираются для различных технологических применений. При этом одним из актуальных направлений в области технологического применения лазеров является изучение особенностей взаимодействия лазерных пучков большой апертуры с тонкими металлическими листами из различных сплавов толщиной несколько миллиметров.

В данной работе, как развитие исследований представленных в [1], приведены экспериментальные результаты по нагреву алюминиевого сплава АМг-6 в условиях обдува и при различных размерах зоны воздействия ЛИ.

Постановка эксперимента

Схема проведения экспериментов по лазерному нагреву алюминиевого сплава АМг-6 представлены на рис. 1.

Волоконный лазер генерировал непрерывное излучение длиной волны 1,07 мкм, с гауссовым распределением интенсивности ЛИ диаметром пучка равным ≈ 1 см и эффективным радиусом $r_{эфф} = 0,23$ см. Выходной пучок лазера, проходя через телескопическую систему линз, расширялся до необходимых размеров, падал на образец. В экспериментах эффективный радиус падающего на образец пучка ЛИ изменялся от 0,58 до 2,87 см.

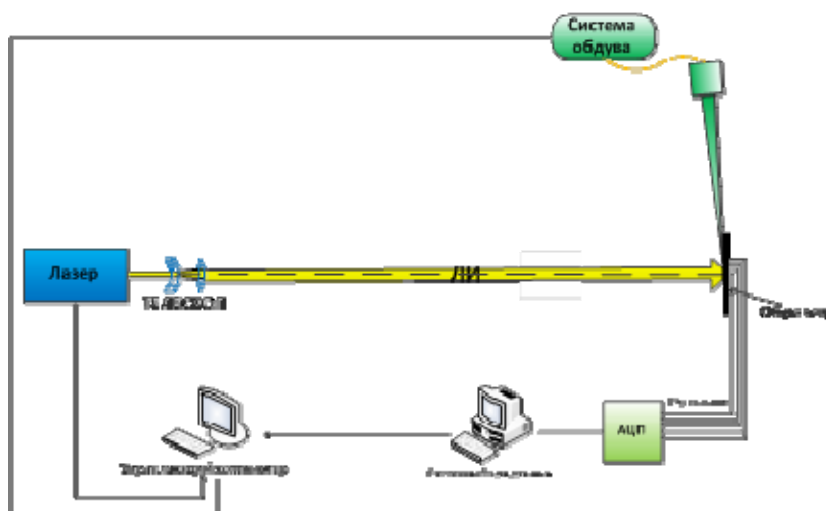


Рис. 1. Схема проведения испытаний образцов

Эффективный радиус пятна определялся при помощи обработки изображения, полученного с камеры. Погрешность определения эффективного радиуса пучка ЛИ составила 10 %.

На рис. 2 показан профиль лазерного пучка, выходящего из коллиматора волоконного лазера. Распределение интенсивности гауссова пучка нормировано на максимальную интенсивность $q_0(r=0)$. Из рис. 2, в частности, видно, что отношение максимальной интенсивности ЛИ на оси пучка в $\approx 2,3$ раза больше средней интенсивности гауссова пучка, определяемой по уровню $q_0(r=0)/e^2$.

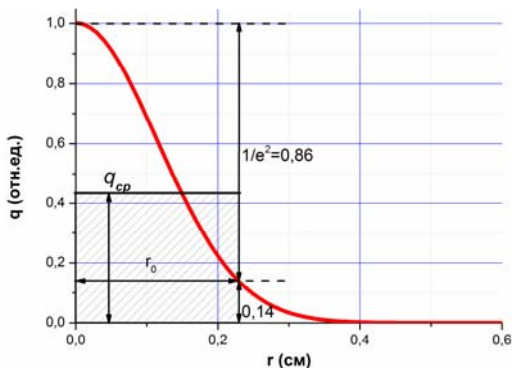


Рис. 2. Профиль лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности

Исследуемые образцы представляли собой пластины из алюминиевого сплава АМг-6 высотой ≈ 20 см, шириной ≈ 20 см и толщиной ≈ 2 мм. С тыльной стороны образца прикреплялись 3–5 хромель-алюмелевых термопар с шагом ≈ 5 мм. Расположение термопар приведено на рис. 3. Термопары крепились на образец при помощи чеканки. Глубина чеканки рабочих спаев термопар составляла 0,4–0,7 мм. Сигналы с термопары регистрировались на компьютере с помощью портативного регистратора аналоговых сигналов «S-Recorder-L», внесенного в Государственный Реестр средств измерений. Подробное описание методики изложено в работе [2]. Погрешность измерения температуры составила 5 %.

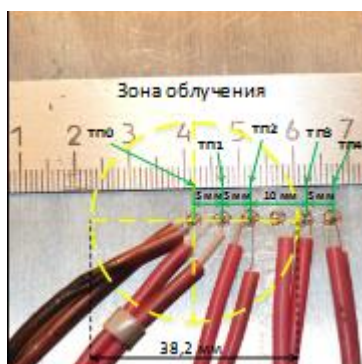


Рис. 3. Расположение термопар на тыльной стороне образца

Синхронный запуск системы регистрации измеряемых параметров осуществлялся при помощи разработанного блока синхронизации.

Перед воздействием ЛИ лицевая поверхность образца находилась в состоянии поставки, при этом начальный коэффициент отражения достигал 70–90 %.

В некоторых экспериментах по воздействию ЛИ на листовые образцы из алюминиевого сплава АМг-6 дополнительно использовалась система обдува, с помощью которой над зоной лазерного воздействия создавался поток воздуха со скоростью от 150 до 200 м/с. Система обдува, разработанная авторами, использовалась для выявления эффекта влияния обдува.

Схема системы обдува представлена на рис. 4.

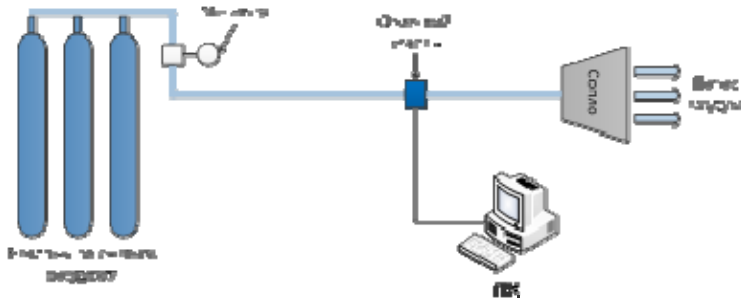


Рис. 4. Схема системы обдува

Система обдува состоит из сопла и баллонов сжатого воздуха, которые соединены между собой медными трубопроводами. Запуск системы обдува происходил дистанционно, путем включения отсечного клапана. Внешний вид сопла системы обдува представлен на рис. 5.

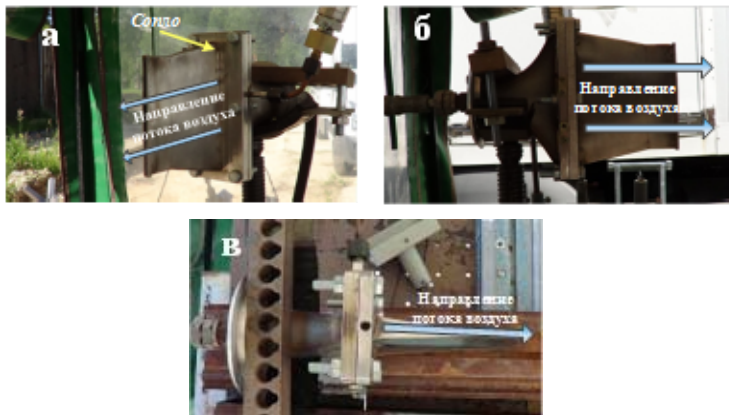


Рис. 5. Внешний вид системы обдува: а – вид с лицевой стороны, б – вид с тыльной стороны, в – вид сверху

Исследование влияния размера пятна ЛИ

При проведении экспериментов по исследованию влияния размера пятна ЛИ на образцы последовательно воздействовали лазерным излучением с одинаковым временем ЛИ $t_{\text{ЛИ}} = 10$ сек и постоянной интенсивностью $q_{\text{эфф}} = 190$ Вт/см², при этом варьировался размер пятна.

Основные результаты экспериментов по исследованию влияния размера пятна ЛИ на пластины из алюминиевого сплава представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты опытов по исследованию влияния размера пятна ЛИ на пластины

№ опыта	Параметры ЛИ			Примечание
	$r_{\text{эфф}}, \text{ см}$	$q_{\text{эфф}}, \text{ Вт/см}^2$	$T_{\text{макс тыл}}, \text{ }^\circ\text{C}$	
1	1,02	190	200	Цвет поверхности не изменился
2	1,22		220	Цвет поверхности не изменился
3	1,5		300	Цвет поверхности не изменился
4	2,02		470	Поверхность потемнела
5	2,1		480	Поверхность потемнела
6	2,28		515	Поверхность потемнела
7	2,36		500	Поверхность потемнела
8	2,54		550	Поверхность потемнела
9	2,87		610	Начало плавления

На рис. 6 и 7 представлены результаты лазерного нагрева образцов из листов АМг-6 толщиной 2 мм на установке с волоконным лазером. В проведенной серии экспериментов на один и тот же образец последовательно воздействовали лазерным излучением постоянной интенсивности, но эффективный радиус лазерного пучка менялся в диапазоне от 1,02 до 2,87 см, что почти на порядок увеличивало площадь пятна.

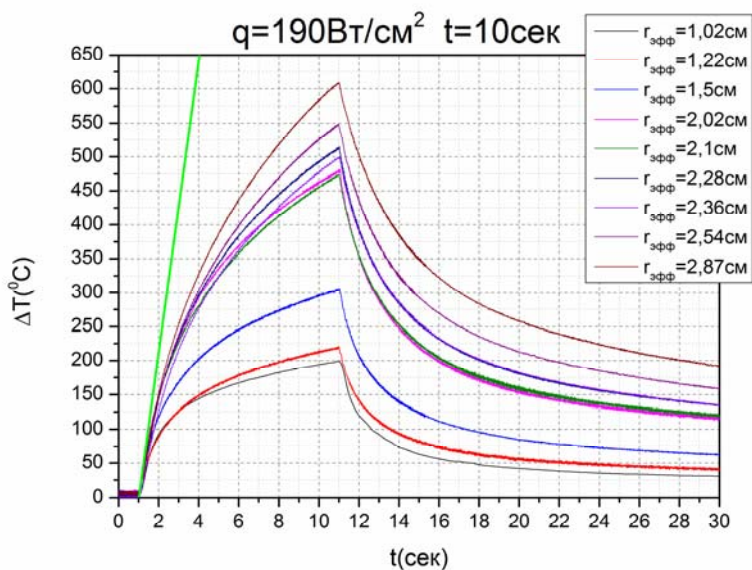


Рис. 6. Нагрев образцов из алюминиевого сплава АМг-6

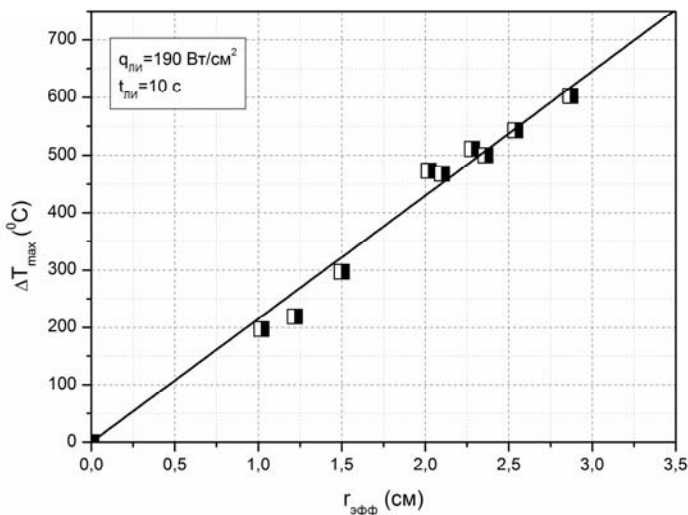


Рис. 7. Максимальный нагрев образцов из алюминиевого сплава АМг-6

При небольших размерах лазерного пучка $r_{\text{эфф}} \sim 1$ см рост температуры образца в зоне лазерного нагрева происходит с постоянным уменьшением темпа нагрева. Это связано с увеличением радиального оттока тепла из зоны лазерного нагрева в холодные области образца вне пятна воздействия. Например, если в начальные моменты времени воздействия темп нагрева образца достигает 150–300 град/с, то в конце воздействия темп нагрева уменьшается в несколько раз и составляет 20–50 град/с.

Из рис. 6 и 7 четко видна отмеченная выше закономерность – увеличение размеров пятна при прочих равных условиях приводит к увеличению как темпа нагрева, так и максимального нагрева в конце лазерного воздействия. Так, если при эффективном радиусе пятна, равном 1 см, максимальный нагрев в конце 10-й секунды лазерного нагрева равнялся 200 градусам, то при почти вдвое большем радиусе пятна максимальный нагрев увеличивается в те же 3 раза и достиг температуры плавления алюминия. Отметим, что это не предел. Литературные данные [3] и оценки показывают, что при дальнейшем увеличении радиуса пятна до ~10 см при той же интенсивности лазерного излучения образец проплавился бы за 2–3 сек.

Таким образом, при одной и той же интенсивности лазерного излучения в сотни Вт/см², увеличение площади лазерного пятна на образце от единиц до сотен квадратных сантиметров приводит к многократному (в 3–5 раз) снижению времени проплавления тонких металлических листов.

Воздействие ЛИ на АМг-6 с обдувом

Основные результаты экспериментов по воздействию ЛИ на листовые образцы из алюминиевого сплава АМг-6 с обдувом представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты опытов по взаимодействию ЛИ с образцами из АМг-6 при обдуве воздухом

№ опыта	Параметры ЛИ					Примечание
	$r_{эфф}$, см	$q_{эфф}$, Вт/см ²	$T_{макс}$ тыл, °С	$t_{ли}$, сек	W , Дж/см ²	
1	1,6	150	130	5	750	Поверхность образца без изменения
2		260	370	15	3900	Поверхность образца без изменения
3		380	570	20	7600	Плавление
4		530	640	15	7950	Плавление
5	2,9	210	625	20	4300	Плавление
6		210	640	30	6300	Расплав

На рис. 8 приведена зависимость нагрева образцов из алюминиевого сплава АМг-6 от времени при воздействии излучения при различных размерах пятна воздействия с обдувом.

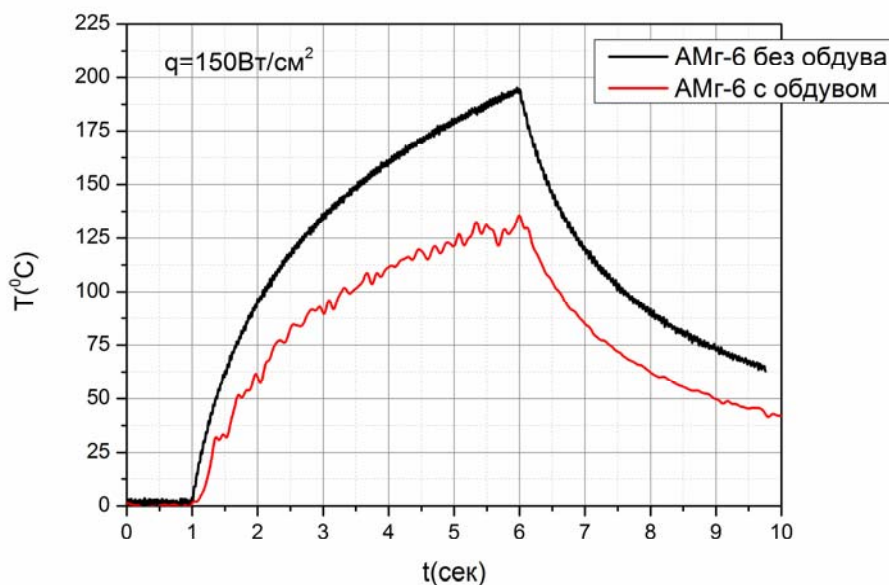


Рис. 8. Нагрев тыльной поверхности образца при обдуве и без обдува

Анализируя график на рис. 8 видно, что при обдуве образцов из алюминиевого сплава АМг-6 нагрев происходит медленнее, нежели без обдува.

Из решения уравнения теплового баланса, приведенного в [1], для экспериментов с одинаковой интенсивностью 150 Вт/см^2 без обдува и с обдувом, условия обдува можно промоделировать увеличением коэффициента конвективного охлаждения в широком диапазоне значений. На рис. 9 приведен нагрев тыльной поверхности образцов при их обдуве со скоростью от 150 до 200 м/с при облучении ЛИ с различными параметрами.

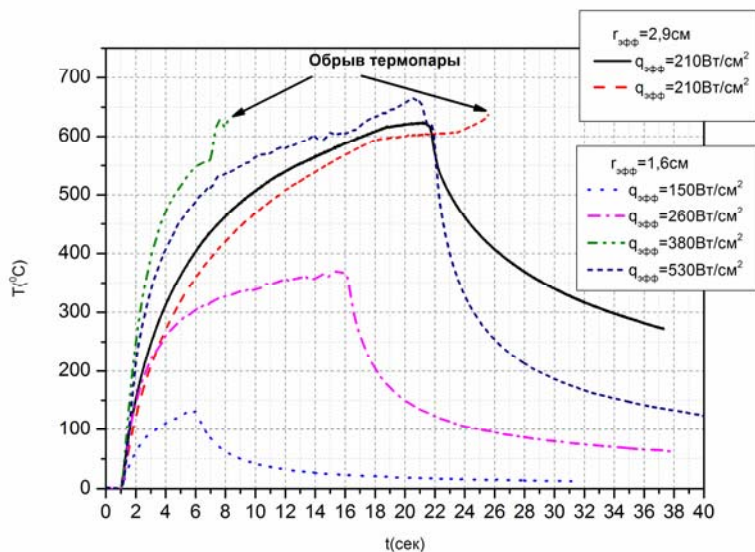


Рис. 9. Нагрев тыльной поверхности образцов при обдуве со скоростью 150–200 м/с

На рис. 10 приведена зависимость плотности энергии от максимальной температуры образцов при обдуве и без него при воздействии ЛИ с эффективным радиусом пятна $r_{эфф} = 0,58 \text{ см}$ и $r_{эфф} = 1,6 \text{ см}$. Данные по обдуву для $r_{эфф} = 0,58 \text{ см}$ получены по оценкам из данных, представленных на рис. 7.

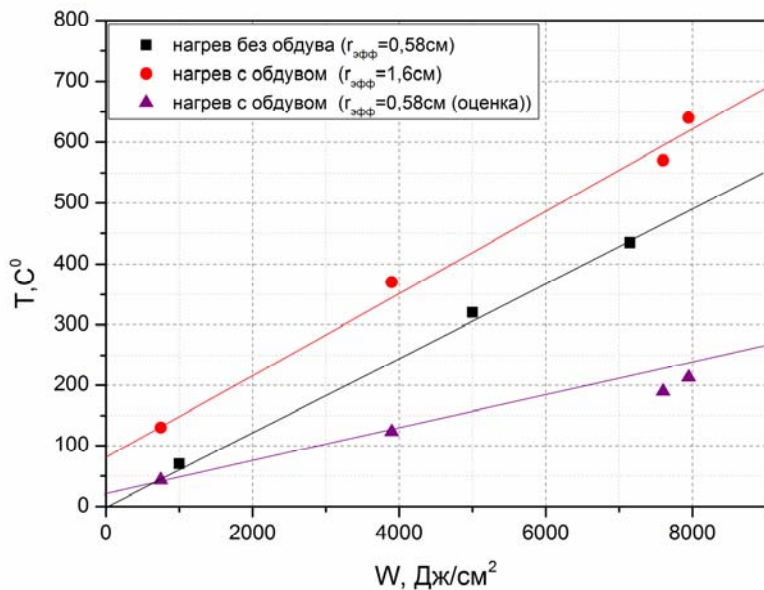


Рис. 10. Зависимость максимального нагрева с обдувом и без обдува

Из рис. 10 видно, что во всем исследованном диапазоне плотности энергии максимальная температура образца из алюминиевого сплава АМг-6 без обдува в два раза выше, чем при обдуве.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования воздействия лазерного излучения на тонкие листы из алюминиевого сплава АМг-6 толщиной 2 мм показали сильное влияние размера лазерного пятна на скорость нагрева металлических образцов и их максимальный нагрев, так как при увеличении размера лазерного пятна радиальный отток тепла из центральной области воздействия становится пренебрежимо малым по сравнению с интенсивностью падающего лазерного излучения.

Так, при эффективном радиусе пятна, равном ~ 1 см и интенсивностью лазерного излучения 190 Вт/см^2 , максимальный нагрев образца из АМг-6 в конце 10-й секунды лазерного воздействия равнялся 200 градусам, тогда как при втрое большем радиусе пятна максимальный нагрев увеличивается также в 3 раза и достигает температуры плавления алюминия. Оценки показывают, что при дальнейшем увеличении радиуса пятна образец полностью проплавится за 2–3 секунды при той же интенсивности лазерного излучения.

Проведенные экспериментальные исследования показали сильное влияние обдува лицевой поверхности алюминиевого сплава АМг-6 на его лазерный нагрев. Например, при нагреве образцов лазерным излучением с одинаковой интенсивностью при обдуве максимальный нагрев достигал $125 \text{ }^\circ\text{C}$, а без обдува $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Список литературы

1. Мансуров К. Р., Авдошина О. Е., Макейкин Е. Н., Маркин С. В. Воздействие непрерывного лазерного излучения на образцы металлических конструкционных материалов // X всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. 2016. Саров.

2. Кокшаров В. В., Мазанов В. А., Макейкин Е. Н., Маркин С. В., Павлунина О. Е., Сиренко А. В. Определение излучательной способности нержавеющей стали 12Х18Н10Т в широком диапазоне температур // XIII Научно-техническая конференция «Молодежь в науке». 2014. Саров.

3. Boley C. D., Cutter K. P., Fochs S. N., Pax P. H., Rotter M. D., Rubenchik A. M., Yamamoto R. M. Interaction of high-power laser beam with metal sheets. *Journal of applied physics* 107,043106 2010.

4. Захаров Н. С., Урлин В. Д., Шенцев Н. И. Тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты при взаимодействии лазерного излучения с веществом. Саров. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2004 г.