

ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБРАЗЦЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

О. Е. Авдошина, Е. Н. Макейкин, К. Р. Мансуров, С. В. Маркин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИЛФИ, 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. Оно так же позволило разработать физические основы многочисленных прикладных направлений, связанных с лазерами и их применениями в технологии.

Поэтому знание основных механизмов и закономерностей воздействия лазерного излучения на вещество необходимо для определения различных оптических свойств материалов. Это стимулирует проведение специальных и систематизированных исследований материалов, которые выбираются для различных технологических применений.

В работе представлены результаты нагрева нержавеющей стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава АМг-6 с различными начальными состояниями поверхности, а так же результаты измерения одного из важных параметров материала, такого как коэффициент отражения.

Особенности взаимодействия лазерного излучения с конструкционными металлами

При падении лазерного излучения на вещество часть его энергии отражается, а оставшаяся часть поглощается в поверхностном слое. Поглощение ЛИ в инфракрасном, видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах длин волн описывается законом Бугера – Ламберта – Бера [1, 2]:

$$I(x) = I_0(1 - R)\exp(-\alpha x), \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность светового луча на поверхности, R – коэффициент отражения, α – показатель поглощения, x – координата, отсчитываемая вглубь материала. Как видно из соотношения (1) толщина слоя поглощения лазерного излучения пропорциональна α^{-1} . Для металлов, у которых коэффициент поглощения ЛИ велик, глубина проникновения излучения в объем составляет малую величину не превышающую $10^{-7} - 10^{-6}$ м [1, 2].

Энергия, поглощенная в слое металла идет на его нагрев и передается теплопроводностью вглубь материала. Кинетика этого процесса описывается уравнением теплопроводности [2, 3]. 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 $T_{пл}$. Разрушение высокоплотных металлов, которые не разлагаются при температурах ниже кипения T_K , связано с процессами испарения.

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. В этом случае, как видно из рис. 1, балансовое уравнение квазистационарного процесса термохимического разрушения тонкого слоя образца под воздействием лазерного излучения имеет вид [2]:

$$cL\rho \frac{dT}{dt} = (1-R)I_p - \varepsilon\sigma T_s^4 - m'H_{TX} - \lambda \frac{dT_n}{dx} - \alpha(T - T_0), \quad (2)$$

где L , c и ρ – толщина, теплоемкость и плотность образца; I_p – плотность мощности падающего лазерного излучения; ε – коэффициент черноты; R – коэффициент отражения лазерного излучения исследуемого металла; T_s – температура поверхности мишени в зоне воздействия; σ – постоянная Стефана – Больцмана; m' – массовая скорость разрушения металла; H_{TX} – теплота процесса термомеханического разрушения; λ – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент конвективного охлаждения, T_0 – температура окружающей среды.

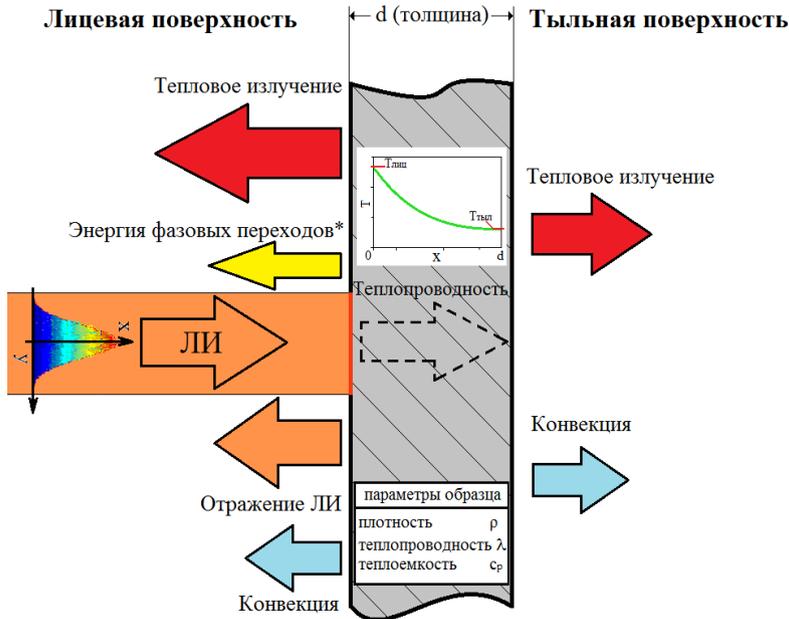


Рис. 1. Схема потоков энергии при взаимодействии ЛИ с металлом

Следовательно, как это видно из соотношения (2) для изучения характера воздействия ЛИ на образец и разработки модели взаимодействия лазерного излучения с различными металлами необходимо, во-первых, знать их теплофизические и оптические характеристики, входящие в балансовое уравнение, такие как теплоемкость, теплопроводность, коэффициент отражения, излучательную способность и их зависимости от времени и температуры. Во вторых, на протяжении всего процесса воздействия контролировать следующие физические величины: зависимость мощности ЛИ от времени; температуры лицевой и тыльной поверхностей образца; потери энергии на отражение ЛИ и тепловое излучение от образца.

Таким образом, взаимодействие ЛИ с металлами является сложным многостадийным процессом. Исследование такого процесса требует наличия комплексной методики измерений, позволяющей в течение всего времени взаимодействия синхронно регистрировать параметры воздействующего ЛИ, температуры лицевой и тыльной поверхностей образца, а также характеристики отражения ЛИ. Кроме того, необходимо определять теплофизические и оптические характеристики металлов образца во всем диапазоне достижимых температур.

Определение параметров ЛИ

Для установки, имеющей пространственное распределение интенсивности ЛИ в выходном пучке в виде распределения Гаусса, дополнительно определялись эффективные параметры ЛИ на образце, когда воздействие ЛИ данной формы наиболее близко к равномерному распределению. В этом случае распределение интенсивности ЛИ на образце описывается выражением [2]:

$$q(x) = q_{MAX} e^{-2 \cdot \frac{x^2}{r_{эфф}^2}}, \quad (3)$$

где $r_{эфф}$ – эффективный радиус распределения Гаусса, который характеризует, что при $x = r_{эфф}$ интенсивность ЛИ падает в e^2 раз.

Тогда эффективная площадь воздействия $S_{эфф}$ будет определяться как площадь круга данного радиуса. Так как на эту площадь попадает $\approx 86\%$ падающей мощности ЛИ, то, соответственно, эффективная мощность $P_{эфф}$ равна $\approx 86\%$ от мощности ЛИ $P_{ли}$. Тогда эффективная плотность мощности $q_{эфф}$, учитывая пропускание телескопа $\approx 88\%$, определяется из выражения:

$$q_{эфф} = \frac{P_{ли} \cdot 0,88 \cdot 0,86}{S_{эфф}}. \quad (4)$$

Эффективная плотность энергии $e_{эфф}$ вычисляется по формуле:

$$e_{эфф} = q_{эфф} t_{ли}. \quad (5)$$

Постановка эксперимента

На рис. 2 представлена схема проведения экспериментов.

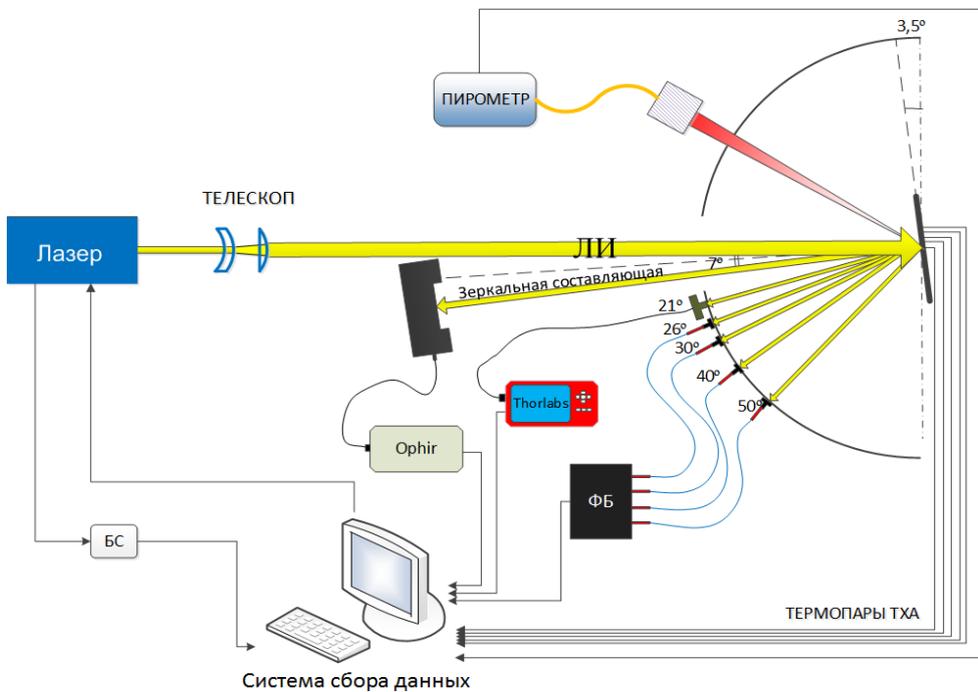


Рис. 2. Схема проведения испытаний образцов на установке:
БС – блок синхронизации, ФБ – фотометрический блок

Волоконный лазер генерировал непрерывное излучение длиной волны 1,07 мкм и эффективным радиусом $r_{эфф} = 0,23$ см. Выходной пучок лазера, проходя через систему линз (телескоп), расширился до необходимых размеров, падал на образец, который располагался в геометрическом центре измерительной полусферы под углом $3,5^\circ$.

Образцы представляли собой пластины из нержавеющей стали и алюминия длиной ≈ 10 см, шириной ≈ 10 см и толщиной ≈ 2 мм. С тыльной стороны образцов прикреплялись термопары ТХА и ТВР. Термопары ТХА приваривались к поверхности образца при помощи конденсаторной сварки. Термопары ТВР крепились на образец при помощи чеканки. Глубина зачеканки составляла 1 мм. Сигналы 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 [4].

Для определения коэффициента отражения измерялось диффузно-отраженное и зеркально отраженное ЛИ.

Для регистрации диффузно-отраженного ЛИ в качестве опорного канала использовался измеритель мощности лазерного излучения ThorLabs PM100D. Приемная головка регистратора вставлялась в кассету с входным отверстием 3,2 мм и была снабжена фильтром Thorlabs серии FB-1064-10 на длину волны 1,07 мкм и пропусканием ~ 50 %. Кроме того для регистрации применялась четырехканальная измерительная система (фотометрический блок), в каждом канале измерений которой использовались кремниевые фотодиоды фирмы Hamamatsu. Для выделения доли отраженного ЛИ на этих каналах также использовались интерференционные фильтры, пропускающие излучение с длиной волны 1,07 мкм. Датчики располагались на полусфере под углами от 14° до 43° относительно нормали образца.

Для регистрации зеркально отраженного ЛИ использовалась термопарная головка L1500W-SH измерителя мощности OPHIR IZ01200.

Синхронный запуск регистрации всех измеряемых параметров осуществлялся при помощи блока синхронизации.

Результаты проведенных экспериментов

Проведены измерения по определению темпа нагрева и коэффициентов отражения образцов, широко применяемых в промышленности: нержавеющей стали 12X18H10T и алюминиевого сплава АМГ-6.

Характеристики исследуемых образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Начальные характеристики образцов

Материал образца	Начальное состояние
12X18H10T	Состояние поставки (с различными пятнами на лицевой стороне)
12X18H10T	Шероховатость Rz40
12X18H10T	Окисная пленка
12X18H10T	Углеродное покрытие (сажа)
АМГ-6	Состояние поставки
АМГ-6	Углеродное покрытие (сажа)
АМГ-6	Покрытие белой эмалью

Результаты испытаний образцов из нержавеющей стали 12X18H10T

В результате проведения исследования взаимодействия ЛИ с нержавеющей сталью были получены зависимости температуры от времени и коэффициента отражения от температуры для разных начальных состояний. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Результаты испытаний образцов из нержавеющей стали 12X18H10T

$r_{эфф}$ на образце, см	$e_{эфф}$, кДж/см ²	$T_{макс}$ тыл, °С	$R_{отр}$ в начале ЛИ, %	$R_{отр}$ в конце ЛИ, %	Начальное покрытие образца	Конечное состояние поверхности
0,58	1	520	1	1	Углеродное покрытие	Поверхность без изменения
	2,9	920	60	42	Состояние поставки	Окисление поверхности
	3,6	1080	30	32		Окисление поверхности
	1	275	45	45	Шероховатость Rz40	Поверхность без изменения
	4,3	1230	41	35		Окисление поверхности
	1	435	17	17	Окисная пленка	Поверхность без изменения
	3,6	1150	37	25		Плавление поверхности
	4,3	1315	15	15		Плавление поверхности
	4,5	1350	12	12		Плавление поверхности

На рис. 3 представлена зависимость максимальной температуры от плотности энергии.

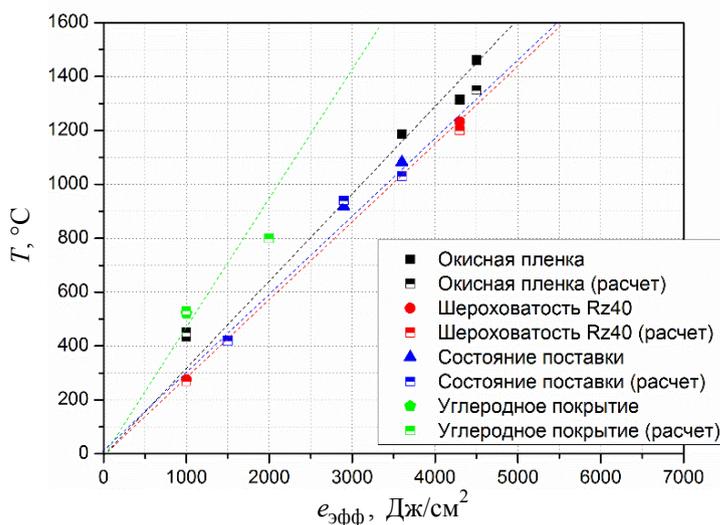


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры от плотности энергии

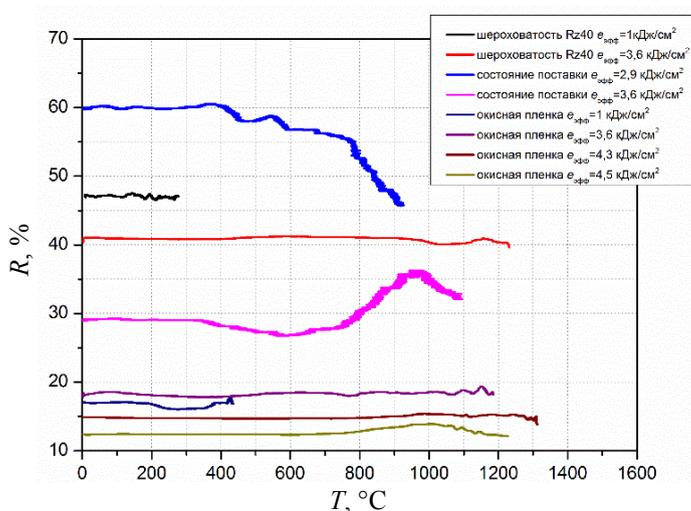


Рис. 4. Зависимость коэффициентов отражения от температуры

Из рис. 3 видно, что при увеличении плотности энергии максимальная температура для всех образцов при различных исходных поверхностях увеличивается линейно. Минимальный нагрев $T_{\text{макс}} = 275 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдался у образцов с шероховатостью Rz40, а максимальный $T_{\text{макс}} = 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ у образцов, покрытых окисной пленкой. Следует отметить, что при одной и той же плотности энергии у образца с углеродным покрытием $T_{\text{макс}}$ больше, чем у образцов с шероховатостью Rz40 и окисленной поверхностью. Таким образом, чтобы достичь температуры плавления образца с углеродным покрытием, необходима меньшая плотность энергии, нежели для образца с шероховатостью Rz40. То есть начальное состояние поверхности оказывает большое влияние на максимальный нагрев.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициентов отражения от температуры при различной плотности энергии и начального состояния поверхности.

Из рис. 4 видно, что у образцов, покрытых окисной пленкой, или с шероховатостью Rz40 коэффициент отражения при увеличении температуры практически не изменяется. В то же время при облучении образцов в состоянии поставки коэффициент отражения значительно изменится в течение всего нагрева, что связано с образованием на поверхности образцов слоя окислов.

Результаты испытаний образцов из алюминия АМГ-6

В результате проведения исследования взаимодействия ЛИ с алюминием были получены зависимости температуры от времени и коэффициента отражения от температуры для разных начальных состояний. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов из алюминия АМГ-6

$r_{\text{эфф}}$ на образце, см	$e_{\text{эфф}}$, кДж/см ²	$T_{\text{макс}}$ тыл, °C	$R_{\text{отр}}$ в начале ЛИ, %	$R_{\text{отр}}$ в конце ЛИ, %	Начальное состояние поверхности	Конечное состояние поверхности
0,58	1	70	81	83	Состояние поставки	Поверхность без изменения
	5	320	83	86		Поверхность без изменения
	7,15	435	79	75		Поверхность без изменения
	10,7	845	72	27		Плавление образца
1,51	1	360	70	74		Поверхность без изменения
1,91	1,6	395	75	76		Поверхность без изменения
1,3	0,5	445	2	2	Углеродное покрытие	Поверхность без изменения
	0,66	595	2	2		Плавление образца
	1,5	720	7	16		Плавление образца
	0,5	210	44	30	Покрытие белой эмалью	Поверхность без изменения
2	830	41	5	Плавление образца		

На рис. 5 представлена зависимость максимальной температуры от плотности энергии.

При нагреве образцов большую роль имеет эффективный радиус $r_{\text{эфф}}$. Из рис. 5 видно, что при нагреве образцов в состоянии поставки различным эффективным радиусом $r_{\text{эфф}}$, максимальная температура значительно отличается. Например, для $r_{\text{эфф}} = 0,58 \text{ см}$ максимальная температура $T_{\text{макс}}$ равна $70 \text{ }^\circ\text{C}$, а для $r_{\text{эфф}} = 1,51 \text{ см}$ и $1,91 \text{ см}$ $T_{\text{макс}}$ равны $360 \text{ }^\circ\text{C}$ и $395 \text{ }^\circ\text{C}$, соответственно. Так же стоит отметить, что для нагрева образцов до $T_{\text{макс}} = 830 \text{ }^\circ\text{C}$ эффективным радиусом $r_{\text{эфф}} = 1,3 \text{ см}$, покрытых белой эмалью требуется значительно меньшая плотность энергии, по сравнению с нагревом образцов до $T_{\text{макс}} = 845 \text{ }^\circ\text{C}$ эффективным радиусом $r_{\text{эфф}} = 0,58 \text{ см}$ в состоянии поставки.

Следовательно, для достижения более высоких температур следует использовать больший эффективный радиус пучка.

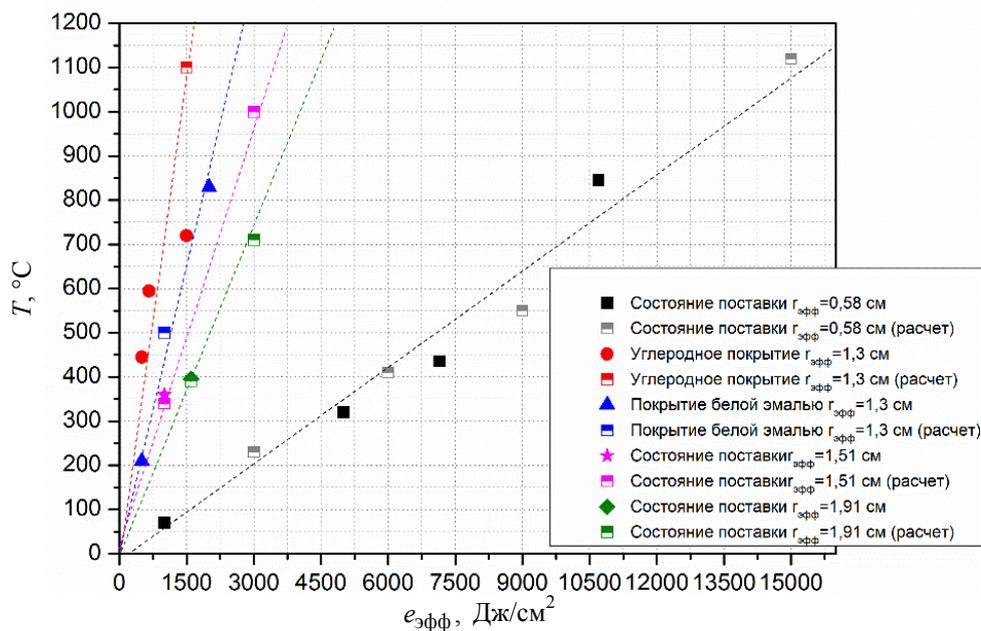


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры от плотности энергии

На рис. 6 представлена зависимость коэффициентов отражения от температуры при различной плотности энергии и начального состояния поверхности.

Из рис. 6 видно, что наибольший коэффициент отражения наблюдался у образцов в состоянии поставки, а наименьший у образца с углеродным покрытием. Следует отметить, что коэффициент отражения образца в состоянии поставки при плотности энергии $10,7$ кДж/см² снижается с 70% до 25% при плавлении материала. При нагреве образца с углеродным покрытием $R_{отр}$ увеличивается с 7% до 18% . У образцов с покрытием белой эмалью $R_{отр}$ резко снижается с 40% до 5% при плотности энергии 2 кДж/см². Это связано с «зачернением» лицевой поверхности образца при термическом разложении эмали.

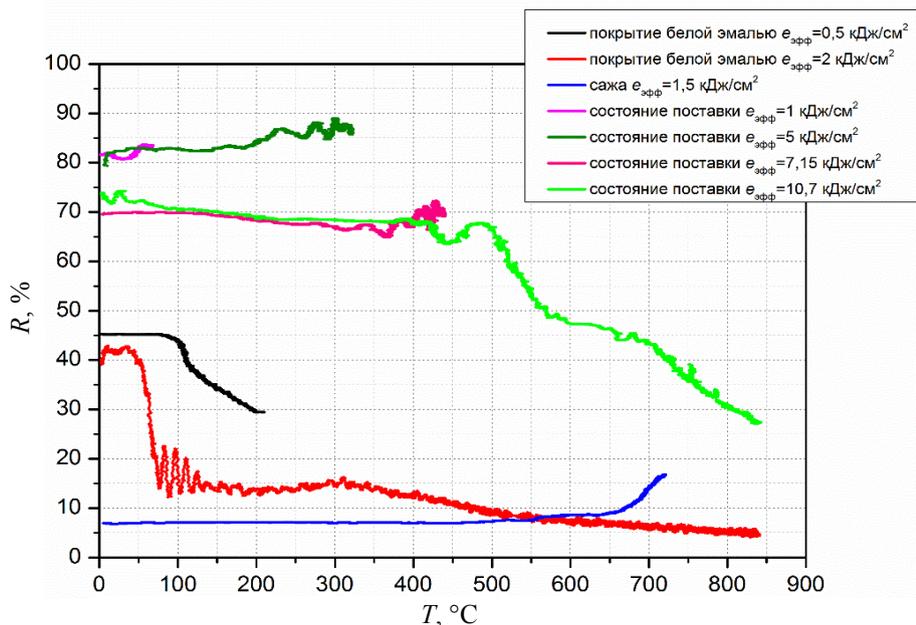


Рис. 6. Зависимость коэффициентов отражения от температуры

Заключение

В работе представлены результаты измерения коэффициента отражения металлических сплавов, широко применяемых в промышленности – нержавеющей стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава АМГ-6 в процессе быстрого нагрева в воздухе излучением волоконного лазера до различных температур при различных начальных состояниях поверхности образцов.

Показано, что коэффициент отражения влияет на максимальный нагрев металлов. Например, при облучении нержавеющей стали с плотностью энергии 1 кДж/см^2 , наибольшее значение температуры ($T_{\text{макс}} = 520 \text{ }^\circ\text{C}$) наблюдалось у образца с коэффициентом отражения $R_{\text{отр}} \sim 1 \%$, а минимальное ($T_{\text{макс}} = 270 \text{ }^\circ\text{C}$) – у образца, имеющего $R_{\text{отр}} = 45 \%$.

В свою очередь, на коэффициент отражения большое влияние оказывает начальное состояние поверхности материала. Например, для образцов из нержавеющей стали в состоянии поставки в начальный момент времени коэффициент отражения $R_{\text{отр}}$ составлял 60% , а для углеродного покрытия $\sim 1 \%$.

Подобные результаты получены и для алюминиевого сплава. Например, при облучении алюминия с плотностью энергии $0,5 \text{ кДж/см}^2$ максимальное значение температуры ($T_{\text{макс}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$) наблюдалось у покрытого сажей образца с коэффициентом отражения $R_{\text{отр}} \sim 2 \%$, а минимальное ($T_{\text{макс}} = 210 \text{ }^\circ\text{C}$) – у образца, покрытого белой эмалью, имеющего $R_{\text{отр}} = 44 \%$.

Так же следует отметить, что для достижения наиболее высоких температур следует использовать большой эффективный радиус пучка. Например, при облучении образцов одинаковой плотностью мощности и эффективным радиусом $r_{\text{эфф}} = 0,58 \text{ см}$ максимальный нагрев составил $70 \text{ }^\circ\text{C}$, а при увеличении эффективного радиуса до $r_{\text{эфф}} = 1,91 \text{ см}$ максимальное значение температуры достигло $T_{\text{макс}} = 360 \text{ }^\circ\text{C}$.

Список литературы

1. Царькова О. Г. Оптические и теплофизические свойства металлов, керамик и алмазных пленок при высокотемпературном лазерном нагреве. Труды института общей физики им. А. М. Прохорова, 2004 г.
2. 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.
3. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М., Мир, 1975.
4. 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.