

ОТРАЖЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ ТИТАНА В ВОЗДУХЕ КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В.И. Насонов

Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь

Кинетике процессов в поверхностном слое, структуре, составе и свойствам образующейся окалины при нагреве титана в различных средах было посвящено много экспериментальных и теоретических исследований (см., например, /1–3/). С развитием современных технологий в разных областях техники, где титан находит применение как химически активный металл (создание многослойных пористых структур для катализа реакций химических процессов, получение протяженных пористых образований, используемых в качестве фильтров, формирование нанотрубок различного применения и др., см., например, /4, 5/) расширение представлений о поведении титана при его нагреве в различных условиях остается актуальным.

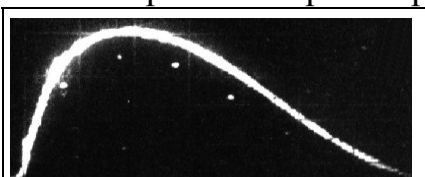


Рис.1. Осциллограмма лазерного импульса

В настоящей работе для нагрева титана использовалось квазинепрерывное излучение неодимового лазера ГОС-1001 ($\lambda = 1.06$ мкм). При изучении изменений в зоне нагрева применялся метод измерения отражения излучения в течение лазерного импульса. Лазерный им-

пульс имел гладкую форму, общую длительность ~ 1.5 мс и длительность переднего фронта ~ 0.3 мс (рис.1). Плотность потока q лазерного излучения (ЛИ) в зоне нагрева изменялась в пределах $0.08 \leq q \leq 0.4$ МВт/см². Мишенями служили образцы титана ВТ1-0 (α -сплав). Поверхности образцов предварительно шлифовались. В ходе облучения при разных q ЛИ одновременно измерялись коэффициенты зеркального (R_z) и диффузного (R_d) отражения, по ним определялся коэффициент полусферического отражения ($R = R_z + R_d$). В /6/ приведены результаты предварительных исследований отражения в процессе лазерного нагрева титана. Но в этой работе поведение отражения на начальной стадии нагрева и роль плазменного факела при повышенных q ЛИ в динамике отражения не рассматриваются. В представленной работе особое внимание уделено изучению указанных вопросов, конкретизированы отдельные заключения ранних исследований.

Результаты исследований представлены на рис.2, а–в. При нагреве титана ЛИ с $q = 0.08$ МВт/см² наблюдалось очищение поверхности от производственных загрязнений (углеводородных пленок и других включений),

что указывает на достижение температуры в зоне облучения $T \geq 770$ К. На заключительной стадии воздействия (рис. 2, а) такое очищение приводило к возрастанию R относительно исходного значения $R_0 = 43\%$. Снижение коэффициентов отражения в начале облучения в этих условиях связано с растворением кислорода в α -титане [7], на чем остановимся позже.

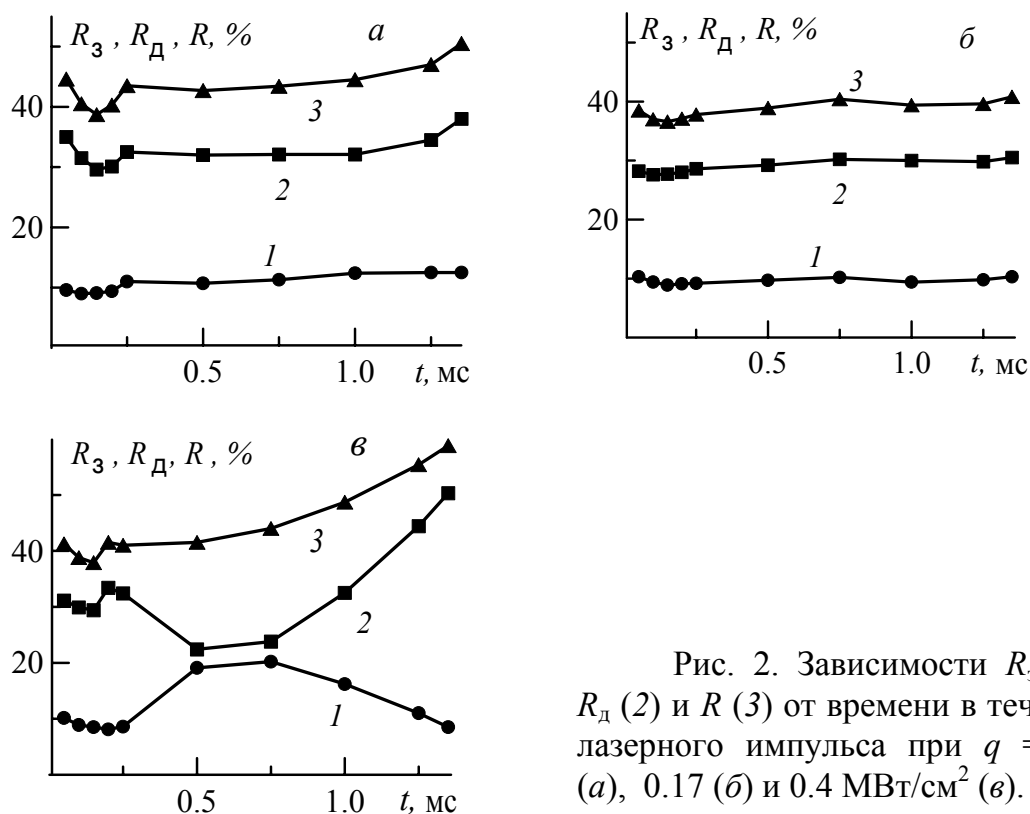


Рис. 2. Зависимости R_3 (1), R_d (2) и R (3) от времени в течение лазерного импульса при $q = 0.08$ (а), 0.17 (б) и 0.4 МВт/см² (в).

При плотности потока ЛИ $q = 0.17$ МВт/см² в зоне нагрева достигались температуры $T \geq 870$ К. Рентгенофазовый анализ показал, что в этих условиях на поверхности происходит твердофазное окисление титана с образованием фаз TiO_2 и Ti_3O_5 . В ходе воздействия (рис. 2, б) рост отражения ЛИ за счет очищения поверхности компенсируется его снижением за счет образования рутила (окаины), имеющего более рыхлую структуру. Влияние растворения кислорода в α -Ti, как и при $q = 0.08$ МВт/см², заметно на начальном участке хода коэффициентов R_3 , R_d и R .

Воздействие на титан при $q = 0.4$ МВт/см² приводило к плавлению поверхности, которое наступало при достижении некоторой мгновенной плотности потока $q(t)$ на переднем фронте лазерного импульса, близкой к q_{max} . Поведение R_3 , R_d и R (рис. 2, в) для этого случая можно объяснить следующим образом. На ранней стадии облучения, когда $q(t)$ мала и температура поверхности не высокая, при нагреве происходит растворение

кислорода воздуха в твердом α -Ti с одновременным окислением металла и образованием в наружном слое относительно устойчивой тонкой пленки из рутила TiO_2 /1/. С повышением $q(t)$ слой пленки прирастает, образуя окалину, содержащую, согласно /8/, и другие соединения титана, в т. ч. слой твердого раствора TiO_2 в Ti_2O_3 и слой TiO . Механизм формирования окалины в данном случае сложен. В общем принято считать /1/, что при нагреве титана на воздухе рост окалины на поверхности обеспечивается диффузией катионов титана из металлической матрицы в окалину и встречной диффузией кислорода и азота воздуха через окалину в металл с растворением их в α -и в меньшей степени β -Ti. Но в нашем случае нагрева металла коротким интенсивным лазерным импульсом необходимо учитывать еще и высокий темп нарастания температуры на поверхности.

При воздействии интенсивного лазерного импульса на воздухе реакция синтеза оксида TiO_2 в зоне нагрева резко неизотермична вследствие сильной положительной обратной связи между скоростью окисления и ростом температуры в металле. Возникающие при этом высокие внутренние термонапряжения в окалине и в прилегающей металлической основе порождают в них дополнительные микропоры и трещины, через которые возрастает диффузия кислорода воздуха в металл, и увеличивается поглощение ЛИ /7/. Поэтому на ранней стадии нагрева коэффициенты отражения R_3 , R_d и R должны снижаться, что и видим при $t \leq 0.25$ мс (см. также рис 2, а, и б). Однако уже на стадии $0.25 \leq t \leq 1$ мс происходят синхронные противоположно направленные изменения коэффициентов отражения R_3 и R_d , что является признаком оплавления шероховатостей наружного слоя и повышения зеркальности поверхности /9/. Такое поведение R_3 и R_d указывает на то, что начиная с момента времени $t \sim 0.25$ мс доминирующее влияние на кинетику отражения начинает оказывать агрегатное превращение титана из твердого состояния в жидкое. С образованием в зоне облучения новых химических соединений титана на отражение будут влиять и их оптические характеристики. Кроме того, в ходе воздействия при $q \geq 0.4$ МВт/см² на отражение ЛИ может оказывать влияние и активация гетерогенного горения титана.

В экспериментах осциллографическим методом регистрировалось свечение плазменного факела, развиваемого вследствие горения титана. При $q = 0.4$ МВт/см² начало, максимум и окончание свечения плазмы достигались в моменты ~ 0.32 , 0.9 и 1.6 мс соответственно. Сопоставление интенсивности свечения плазмы и кинетики коэффициентов отражения в течение лазерного импульса позволило заключить, что в процессе своего развития плазменный слой может оказывать экранирующее действие на мишень, переизлучая часть энергии ЛИ.

Закключение. Во всем диапазоне плотностей потоков $0.08 \leq q \leq 0.4$ МВт/см² в начале облучения все коэффициенты отражения излучения снижаются вследствие растворения в титане кислорода воздуха. В режиме воздействия при $q = 0.08\text{--}0.17$ МВт/см² отражение ЛИ в конце облучения определяется очищением поверхности от загрязнений и появлением на ней начальной рутиловой пленки. При нагреве титана в режиме $q = 0.4$ МВт/см² на стадии $t \geq 0.25$ мс происходит его плавление, и поведение отражения на возрастающей стадии лазерного импульса определяется динамикой профиля поверхности. С развитием плазмообразования вследствие горения титана на стадии близкой к $t = 0.9$ мс отражение излучения проходит в условиях умеренного экранирующего действия плазменного слоя на пути лазерного луча.

Литература

1. **Войтович Р.Ф., Головки Э.И.** Высокотемпературное окисление титана и его сплавов, Киев, Наук. думка (1984)
2. **Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др.** Металлургия и технология сварки титана и его сплавов, Киев, Наук. думка (1986)
3. **Акимов А.Г., Бонч-Бруевич А.М., Гагарин А.П. и др.** Изв. АН СССР, сер. физич., **46** (1982) 1177–1185
4. **Жирков О.Н., Морозов А.П.** Фундамент. исследов., №5 (2006) 84–85
5. **Абрамов Д.В., Герке М.Н., Кучерик А.О. и др.** Квант. электрон., **37**, №11 (2007) 1051–1054
6. **Nasonov V.I.** Contributed Papers V Intern. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology (PPPT-V'2006), 18–22 September 2006, Minsk, Inst-te Mol. At. Phys. NASB (2006) 631–634
7. **Бобырев В.А., Бункин Ф.В., Кириченко Н.А. и др.** Квант. электрон., **9** (1982) 695–703
8. **Акимов А.Г., Гагарин А.П., Дагуров В.П. и др.** ЖТФ, **50** (1980) 2461–2463
9. **Минько Л.Я., Лопарев А.Н., Насонов В.И., Ковалев А.М.** Квант. электрон., **12** (1985) 1211–1219