

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОБЪЕКТЫ

Ю. В. Сорокин

ФГУП «НПО Астрофизика»

Получена 5 мая 2011 г.

Аннотация. Исследуются эффекты при прожигании лазерным излучением слоистых материалов с полимерными слоями. Выявлен характер образования отверстий за счет выброса сублимированного материала полимера. Даны рекомендации по использованию в трубопроводах с полимерным покрытием.

Ключевые слова: лазер, прожигание, взрывоопасная среда, эксперимент, плазма, тепловая волна.

Abstract. The effects are studied at a burn-in by a laser radiation of laminates with polymer in layers. The nature of formation of foramens is detected at the expense of let of the sublimated stuff of polymer. Recommendations of usage in pipe lines with polymer coating are given.

Keywords: laser, burn-in, explosion-dangerous medium, experiment, plasma, thermal surge.

В последние годы, в связи с появлением мощных компактных волоконных лазеров и накопленным опытом создания систем формирования и наведения лазерного луча стало возможным создание мобильных лазерных технологических комплексов [3,6]. Необходимость в них подтверждается увеличением техногенных аварий, при которых необходимо проводить восстановительные операции во взрывоопасной среде, и труднодоступными рабочими зонами. Использование мобильных лазерных комплексов достаточно востребовано в современных условиях в МЧС [1] и для технологических операций в радиопромышленности [2].

Процессы, происходящие при этих работах, были не полностью исследованы.

Анализ результатов проведенных экспериментов [1,2] показал наличие нового эффекта – интенсивного поверхностного горения вещества в закрытой оболочке, приводящего к экспоненциальному росту давления продуктов разложения и, как следствие, достижения предельных прочностных значений стального корпуса сборки. Лазерное воздействие на закрытые заполненные оболочки носит сложный характер и представляет собой двухстадийный процесс. Процесс представляет собой различные физические механизмы: воздействие на внешнюю поверхность оболочки сборки лазерного излучения и тепловое воздействие локального горячего пятна на внутренней поверхности оболочки сборки на поверхностный слой наполняемого вещества.

- Лазерное воздействие на оболочку.

Воздействие на оболочки характеризуется значительным темпом нагрева. Лазерный нагрев можно производить со сквозным и с частичным проплавлением для достижения режимов резки и сварки [6].

Основные параметры режима лазерного нагрева - это энергия и длительность импульсов, диаметр сфокусированного излучения, частота следования импульсов, положение фокального пятна относительно поверхности свариваемых деталей. Длительность лазерного импульса для проплавления должна соответствовать тепловой постоянной времени для данного материала, приближенно определяемой по формуле:

$$\tau = \delta^2 / (4\alpha),$$

где δ и α - соответственно толщина и коэффициент температуропроводности материала. Значения τ для тонких деталей ($\delta = 0,1 \dots 0,2$ мм) составляют несколько миллисекунд, а для толщин 1-2 мм до секунды. По экспериментальным данным [1,2] возможны два варианта: прожигание оболочки (рис.1) и барический разрыв оболочки по образующей (рис.2).



Рис.1



Рис.2

Тепловое действие на наполняемое вещество

Легковоспламеняющиеся вещества — это вещества, способные к экзотермическому превращению, которое передается от реагирующего слоя к близлежащему, распространяясь в виде тепловой волны по всему веществу. Тепловая волна должна иметь температуру воспламенения, при которой вещество испытывает фазовое превращение, и обычно примерно равна 300 °С. Горение возникает при сильных местных разогревах выше температуры вспышки и характеризуется медленным распространением по веществу зоны реакции (пламени) в результате прогрева впереди лежащих слоев вещества. Скорость горения зависит от физико-химических свойств наполняемого вещества и внешних условий (давления, температуры):

$$U = a + bP^{\nu} ;$$

где a - параметр, не зависящий от давления.

b - размерный коэффициент.

ν - безразмерный коэффициент не зависящий от давления и близкий к единице.

P – давление.

Температуры фазового перехода вещества- плавления и испарения являются функцией давления:

$$T_{кр} = T_{p=1} + a*P ; \text{ где } a = 2*10^{-2} \text{ град/атм.}$$

При P менее критическом не возникает условие $T_{кр} = T_{вспышки}$ и происходит распространение волны горения. Это происходит при разгерметизации корпуса за счет прожигания отверстия (рис. 1) или за счет прочностного разрушения

корпуса (рис.2) [1,2].

В результате происходит выброс горевших паров через образовавшееся отверстие. Измерения теплового потока на обратной стороне поверхности показывают наличие различного фазового состояния вещества в зависимости от плотности мощности и скорости разложения п – рис.3.

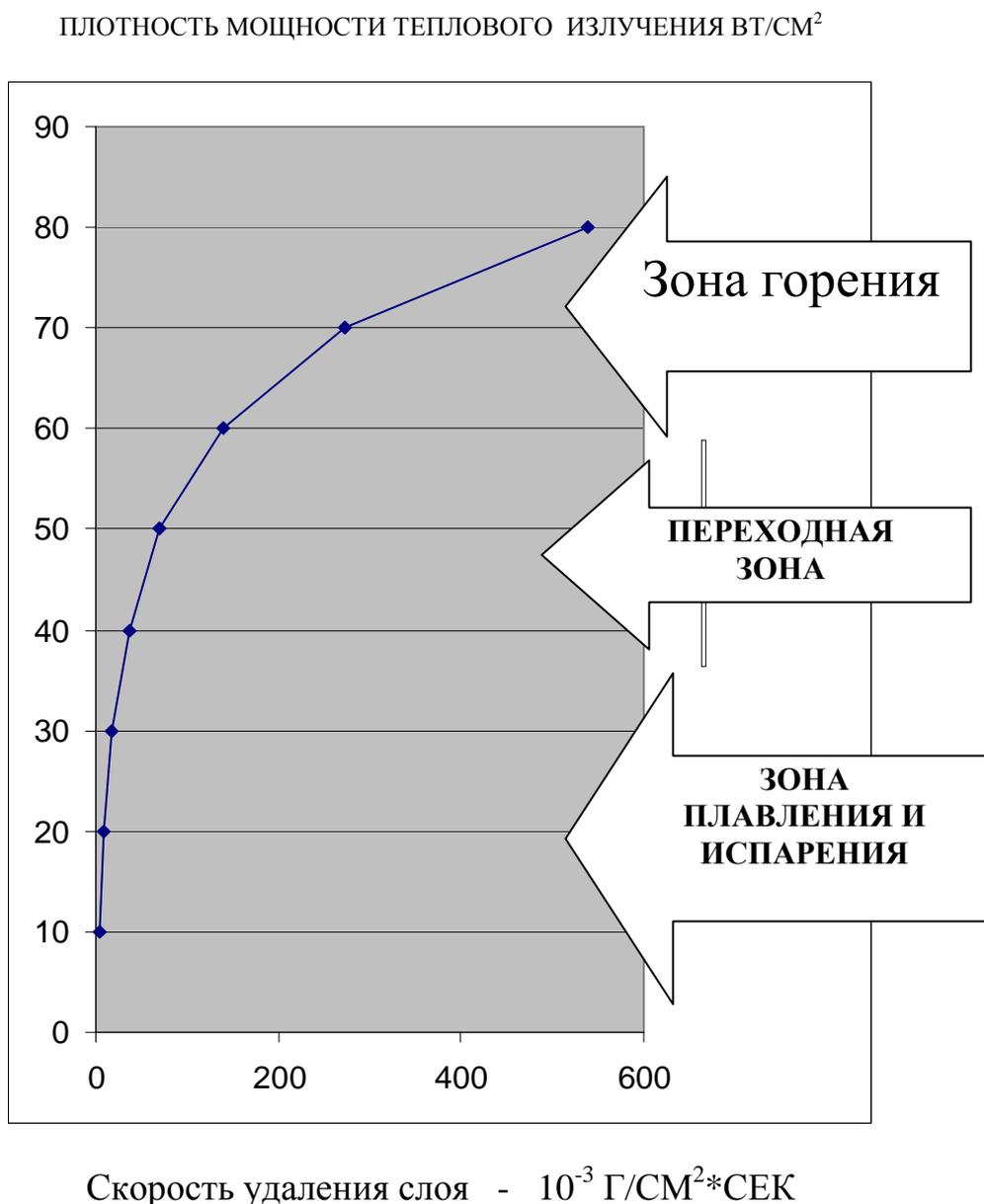


Рис.3. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ УДАЛЕНИЯ СЛОЯ ПОЛИМЕРА ОТ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

Проведенные эксперименты [1,2] показывают надежные результаты по горению и испарению полимера. При воздействии в диапазоне мощностей 10-50 Вт/кв.см. – расплавление и испарение вещества без горения. Массовая скорость испарения описывается выражением:

$$V_m = 0,0024 * 1,07^S * (\Gamma * \text{см}^{-2} * \text{с}^{-1}), \quad S = I/I_0, \quad I_0 = 1 \text{ Вт} * \text{см}^{-2}.$$

Практическая скорость испарения и горения по результатам эксперимента около $-0,4 - 0,6$ г/ кв. см.*сек. При горении скорость удаления увеличивается за счет тепловыделения и пропорциональна площади горения.

Горение возникает при сильных местных разогревах выше температуры воспламенения и характеризуется медленным распространением по материалу в результате прогрева впереди лежащих слоев. Эффекты поверхностного горения описываются механизмами гидродинамических неустойчивостей [2,3]: неустойчивости Релея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца, конвективная и др.. Особенно характерна неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, при которой может развиваться нелинейная стадия, приводящая к сильной вихревой турбулентности потока и, как следствие, к перемешиванию слоев испарившегося вещества и продуктов термического разложения, что приводит резкому возрастанию давления в рабочей зоне. Такие вихревые образования относятся к спиновым волнам воспламенения. Скорость горения зависит от физико-химических свойств наполняемого вещества и внешних условий (давления, температуры) и имеет характер, приведенный на рис.4.

Температура фазового перехода вещества - плавления и испарения являются функцией давления и имеет зависимость, близкую к нелинейной.

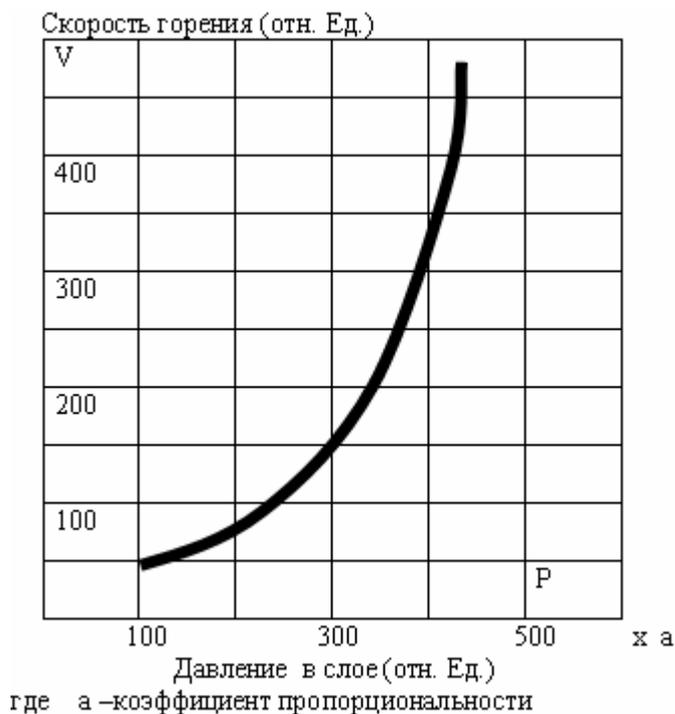


Рис.4. Скорость горения полимера от давления в слое.

В условиях локального поверхностного теплового контакта при экзотермических реакциях развивается поверхностная тепловая плазменная волна горения [4, 5]. Спиновое воспламенение во фронте волны происходит не по всему сечению фронта, а только в определенной части его, вблизи от стенки. Имеется головная часть (ядро) воспламенения, которая движется в трубе по спирали, за ней в виде спирали тянется светящийся хвост пламени (шлейф). Экспериментально доказанные особенности спина: в трубах круглого сечения ядро движется по спирали вдоль стенки; для данной горючей смеси шаг спина пропорционален диаметру трубы. При неоднородностях распространения развиваются гидродинамические неустойчивости: неустойчивости Релея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца, конвективная и др.. Особенно характерна неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, при которой может развиваться нелинейная стадия, приводящая к сильной вихревой турбулентности потока и, как следствие, к перемешиванию слоев испарившегося вещества и продуктов термического разложения, что приводит резкому возрастанию давления в рабочей зоне. Такие вихревые образования относятся к спиновым волнам воспламенения. Спиновое воспламенение во фронте волны происходит не по

всему сечению фронта, а только в определенной части его, вблизи от стенки. Имеется головная часть (ядро) воспламенения, которая движется в трубе по спирали, за ней в виде спирали тянется светящийся хвост пламени (шлейф).

Экспериментально доказанные особенности спина:

- в трубах круглого сечения ядро движется по спирали вдоль стенки;
- для данной горючей смеси шаг спина пропорционален диаметру трубы;
- во время распространения фронта спиновой детонации наблюдаются колебания давления, соответствующие периоду спина;

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца для плоскопараллельного течения со скоростями V_1, V_2 имеет фазовые скорости:

$$c = \frac{U_1 + U_2}{2} \pm i \frac{|U_1 - U_2|}{2}, \quad \text{где вещественная часть фазовой}$$

скорости :

$$c' = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

соответствует теореме Релея о том, что фазовая скорость возмущений лежит в интервале между максимальной и минимальной скоростями, а инкремент неустойчивости Кельвина-Гельмгольца

$$\gamma = k \frac{|U_1 - U_2|}{2}$$

Для неустойчивости Релея-Тейлора рассматривается неустойчивость двух слоев вещества с плотностями ρ_1 и ρ_2 в поле тяжести. Фазовая скорость возмущений

$$c^2 = -\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \frac{g}{k} \quad \text{Инкремент неустойчивости Релея-Тейлора}$$

$$\gamma = c' k = \sqrt{A g k}, \quad \text{где число Атвуда} \quad A = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}.$$

Неустойчивость Релея-Тейлора носит абсолютный, а не конвективный характер. Сравнение неустойчивостей показывает на возможное преимущество модели неустойчивости Релея-Тейлора из-за влияния разности плотностей нагретого и холодного слоев.

На начальном участке течение является неустановившимся. По результатам экспериментальных и теоретических исследований длина начального участка в ламинарном режиме определяется числом Рейнольдса:

$$l_{in} = 0.03 D Re$$

При критическом числе перехода от ламинарного к турбулентному режиму ($Re_{cr} = 2300$), длина начального участка составляет $l_{in} = 69 D$. При развитой турбулентности длина начального участка уменьшается и составляет $l_{in} = (25 — 40)D$.

Такой механизм может использоваться для прочностного разрушения корпуса. При нашем диаметре цилиндра 53 мм для турбулизации и спинового воспламенения необходима минимальная длина от 1250 мм. Видно, что длина в 200 мм не позволяет развиваться неустойчивости и привести к общему воспламенению. Происходит частичный разогрев и воспламенение.

Выводы. Проведенные эксперименты с локальным лазерным прожиганием цилиндрического образца показали наличие нового эффекта поверхностного горения твердого вещества в закрытых оболочках. Данный эффект может быть использован для технологических целей при полевых работах МЧС и ремонтах на нефтегазопроводах. Расчет показал, что такие работы можно вести на локальных участках с длиной не более 100 см для нашего случая, тогда не происходит критического воспламенения вещества внутри полости. Для более крупных систем длина безопасного участка пропорционально увеличивается и может достигать размера более 10 м.

Литература

1. Лазер против мин и снарядов, И.П.Жиган, ж. Оборонный заказ, 2010г., №4, с.33-36.
2. Процессы лазерной резки и сварки слоистых разнородных материалов. В.В.Валуев, И.П.Жиган, С.Н.Игнатьков, Ю.В.Сорокин, Г.С.Григорьев. Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», INTERMATIC-2010 23-27 ноября 2010 г. часть 2, стр. 323-326. М. Энергоатомиздат.
3. Применение высокоомощных волоконных лазеров в процессах сварки, Томи С., Кон Г., Фоллертсен Ф., ж. Автоматическая сварка. - 2006. - № 7. - С. 37-39.
- 4.Энциклопедия низкотемпературной плазмы, т.1 и 2. под ред. Акад. В.Е.Фортова, М. : Наука, 2000 г., стр. 130-133, 145-147.
5. Шкадов В.Я. Некоторые методы и задачи теории гидродинамической устойчивости. М., изд-во МГУ, Труды НИИ Механики, вып. 25, 1973.
6. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология. Лазерная сварка металлов, т. 5 . М. : Высшая школа, 1988г.