

(наибольшее изменение в глубине проникновения зоны и размере частиц окислов у текстурированных образцов, нагруженных попеременно текстуры, характеризуемых большей степенью развития ступенчатости) дает основание предполагать, что указанные следы деформации устойчивы до температуры 950°C и оказывают влияние на диффузионную подвижность реагентов. Однако полученные результаты не позволяют судить о времени жизни дефектов, так как ширина реакционной зоны будет определяться не только ускоренным движением атомов алюминия к фронту реакции, но и движением атомов кислорода, на которое существенное влияние будет оказывать структура выделений, сформировавшихся у поверхности. Образование крупных частиц окислов у поверхности образцов, нагруженных взрывом, уменьшает эффективное сечение для диффузии кислорода, а это определяет меньшую скорость продвижения фронта реакции.

Авторы выражают благодарность Т. С. Тесленко за проведение рентгеновских исследований по определению направления текстуры.

*Поступила в редакцию
13/VIII 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Сикоров, С. В. Першин и др. ФММ, 1972, 33, 5.
2. J. G. Meijering, M. J. Druyvesteyn. Philips Res. Rep., 1947, 2, 81.
3. К. Смителлс. Газы и металлы. М., «Металлургиздат», 1940.
4. S. Mahajan. Physica Status Solidi (a), 1970, 2, 2.
5. G. R. Cowan. Trans. Met. Soc. AIME, 1965, 233, 6.

УДК 621.375.826

ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСА ОТДАЧИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ВОЗДУХЕ

*Н. Н. Козлова, А. И. Петрухин, Ю. Е. Плешанов, В. А. Рыбаков,
В. А. Суляев
(Москва)*

При взаимодействии достаточно мощных потоков лазерного излучения с поглощающими твердыми поверхностями развиваются сложные газодинамические процессы, в значительной степени похожие на процессы, протекающие при взрывах. Особенно велика аналогия с взрывными процессами в случае, когда поглощающая поверхность окружена газами или парами. Так, например, в работе [1] наблюдались ударные волны, распространяющиеся от облучаемого пятна по предварительно испаренному веществу поглощающей поверхности. Ударные волны, аналогичные ударным волнам от точечного безмассового взрыва, распространялись вдоль поверхности преграды и создавали зону повышенного давления на расстояниях, значительно превышающих размеры облучаемого пятна. В механический импульс отдачи, воспринимаемый преградой, значительный вклад будет давать импульс, набираемый вне пятна облучения.

В работе [2] измерялся механический импульс отдачи, приобретаемый дисками из алюминия, вольфрама и углерода, окруженных воздухом нормальной плотности, при облучении лазерным излучением.

В качестве источника излучения использовался ОКГ на CO_2 в моноимпульсном режиме с длительностью импульса 25 мкс и полной энергией до 300 Дж. Излучение лазера фокусировалось в центр дисков из исследуемых материалов, диаметр которых составлял 25—40 мм. Авторами показано, что измеренный механический импульс хорошо согласуется с импульсом, рассчитываемым из решения задачи о точечном взрыве при некоторых предположениях относительно энергии взрыва и его высоты над облучаемой поверхностью. Однако из этих опытов трудно определить эффективность лазерного взрыва по импульсу ударной волны. Эти трудности возникают вследствие двух обстоятельств.

Плотности потока лазерного излучения достигали значений, при которых по воздуху навстречу лазерному лучу распространялись детонационные волны. За время лазерного импульса зона энерговыделения, лежащая на фронте детонационной волны, перемещалась на сравнительно большое расстояние от поверхности облучаемого образца, что затрудняет сравнение с точечным взрывом.

Второе обстоятельство связано с тем, что облучаемый образец размещался в фокусе собирающей линзы. Плотность потока лазерного излучения в облучаемом пятне имеет гауссовское распределение, при котором значительная доля энергии излучения имеет низкую интенсивность на облучаемой поверхности и не дает вклада в лазерный взрыв.

В предлагаемой работе измерялся механический импульс, действующий на плоскую поверхность твердой преграды в воздухе нормальной плотности при облучении излучением ОКГ. В качестве источника излучения использовался ОКГ на неодимовом стекле ($\lambda = 1,06$ мкм) в моноимпульсном режиме. Импульс излучения ОКГ имел колоколообразную форму с длительностью на уровне половинной мощности $\sim 0,5$ мкс. Полная энергия в импульсе, поступающая в облучаемое пятно, достигала 30 Дж. На выходе ОКГ размещалась круглая диафрагма, вырезавшая наиболее однородную часть лазерного пучка. При помощи линзы на облучаемой поверхности строилось изображение этой диафрагмы.

Такой метод позволяет получить облучаемое пятно с резкой границей и однородным распределением интенсивности излучения по всей площади. В нашем случае неоднородность не превышала $\pm 30\%$ от среднего значения. После ограничивающей диафрагмы при помощи стеклянных пластин часть лазерного пучка отводилась на калиброванный калориметр и фотодиод типа ФЭК-14. В каждом опыте измерялась полная энергия, постушившая на облучаемую поверхность, и в некоторых случаях регистрировалась форма импульса излучения ОКГ. Погрешность измерения энергии импульса не превышала $\pm 15\%$.

Механический импульс измерялся при помощи баллистического маятника с погрешностью $\pm 10\%$, на котором укреплялись цилиндры из исследуемых материалов различных диаметров с плоскими торцами. Облучаемое пятно располагалось в центре торца цилиндра. В плоскости торца размещался защитный экран с зазором $\sim 0,5$ мм между цилиндром и экраном. Эти меры были предприняты для устранения затекания ударной волны на тыльную сторону измерителя механического импульса.

В качестве исследуемых материалов использовались алюминий, свинец и графит. При низких плотностях потока лазерного излучения величина измеренного механического импульса зависит от свойств облучаемых материалов, однако с увеличением плотности потока эта зависимость практически исчезает. Ниже приводятся результаты измерений для алюминия.

Механический импульс измерялся на поверхностях диаметром от 5 до 50 мм для трех размеров облучаемых пятен (диаметрами 3, 5, 8 мм). Плотность теплового потока в максимуме лазерного импульса q_{max} варь-

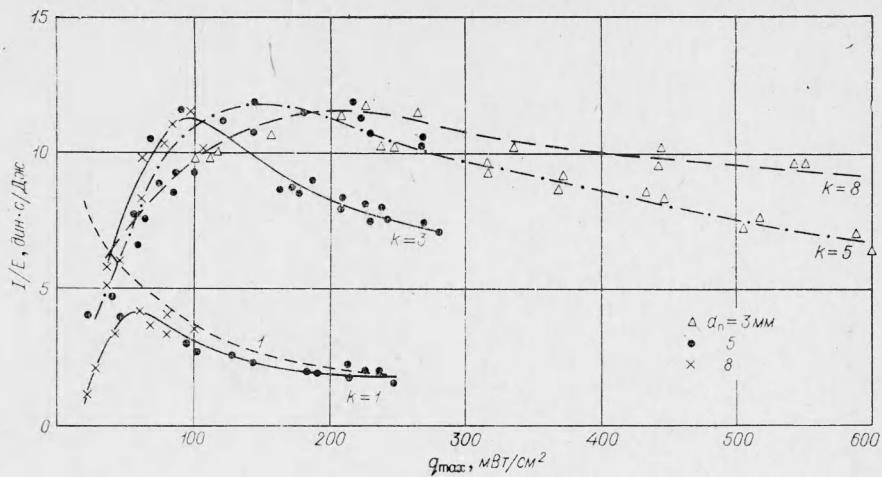


Рис. 1.

ировалась при помощи нейтральных фильтров в пределах от 20 до 600 $\text{МВт} / \text{см}^2$ (плотность энергии в облучаемом пятне от 10 до 300 $\text{Дж} / \text{см}^2$).

Часть результатов измерений приведена на рис. 1. Здесь по оси абсцисс нанесена q_{max} . По оси ординат отложен относительный импульс I/E , где I — полный механический импульс, измеренный маятником, E — полная энергия лазерного импульса. В качестве параметра k принято отношение диаметра измерителя импульса (цилиндра) к диаметру облучаемого пятна d_n . Следует отметить, что относительный импульс зависит только от k и q и не зависит от размеров облучаемого пятна. Результаты для различных диаметров пятен облучения хорошо укладываются на соответствующие кривые.

Роль ударной волны в создании механического импульса на воспринимавшую поверхность хорошо видна из анализа рис. 1. Максимальная величина относительного импульса, измеренного непосредственно под облучаемым пятном ($k=1$), не превышает 4 $\text{дин} \cdot \text{с} / \text{Дж}$. На измерителях же большого радиуса (например, кривая с $k=5$) относительный импульс достигает величины 12 $\text{дин} \cdot \text{с} / \text{Дж}$. Таким образом, на больших площадях основной фактор в создании механического импульса — ударная волна, которая распространяется вдоль поверхности от плазменного факела, развивающегося над облучаемым пятном. Снижение относительного импульса при малых плотностях потока связано с потерями энергии лазерного излучения на отражение и разогрев поверхности алюминия до температур, при которых начинается интенсивное испарение и образование плазменного облака.

Для сравнения лазерного взрыва с обычным следовало бы при определении I/E учитывать энергию, поглощенную в разлетающемся плазменном образовании вблизи облучаемой поверхности. Прямых измерений доли поглощенной энергии лазерного импульса в этих экспериментах не было. Тем не менее можно произвести грубую оценку доли эффективной энергии из следующих соображений.

В работе [3] измерялось изменение коэффициента отражения металлов в процессе действия лазерного импульса. Обнаружено, что коэффициент отражения по мере разогрева поверхности вначале изменяется не сильно, затем в некоторый момент времени резко падает почти до нуля. Падение коэффициента отражения, вероятно, связано с началом интенсивного испарения и возникновением плазменного образования, поглощающего почти всю энергию падающего лазерного луча. Вероятно, достаточно хорошим приближением для определения эффективной энергии лазерного взрыва является предположение о том, что до нача-

ла разлета плазменного факела энергия падающего излучения идет частично на первоначальный нагрев облучаемой поверхности и частично отражается. Энергия же, поступившая после начала разлета, полностью поглощается (без отражения и рассеяния) в плазменном образовании.

Для определения момента начала разлета факела при помощи прибора ЖФР фотографировался разлет факела навстречу лазерному лучу. Одновременно на осциллографе регистрировалась форма излучения лазерного импульса. Фоторегистратор и осциллограф работали синхронно, что позволяло определить начало разлета факела по отношению к началу лазерного импульса и вычислить энергию, поступившую на облучаемую поверхность до начала разлета.

На рис. 2 приведена зависимость плотности энергии лазерного излучения, пошедшего на начальный разогрев облучаемой поверхности, в зависимости от полной плотности энергии в облучаемом пятне за весь импульс. Видно, что на начальный разогрев облучаемой поверхности при малых плотностях потока расходуется значительная доля энергии лазерного импульса. По мере увеличения мощности импульса эта доля уменьшается, причем энергия, требуемая на первоначальный разогрев поверхности, остается практически постоянной и равной ~ 4 Дж/см².

На основе кривой рис. 2 в экспериментальные результаты по измерению механического импульса были внесены поправки: из энергии лазерного импульса вычиталась энергия, пошедшая на начальный разогрев облучаемой поверхности. На рис. 1, 1 приведена кривая с такой поправкой для $k=1$. Как и следовало ожидать, наибольшее значение поправки имеет в области низких значений плотности энергии лазерного импульса.

Для сравнения полученных экспериментальных результатов с точечным взрывом удобно измеренные величины относительных импульсов представить в функции безразмерного параметра $\xi = \frac{r}{r_0}$, где r — радиус поверхности, на которой производилось измерение интегрального механического импульса, $r_0 = \sqrt[3]{\frac{2W}{p_0}}$, W — энергия импульса излучения ОКГ, поступившая на облучаемое пятно за вычетом энергии, пошедшей на начальный разогрев облучаемой поверхности, p_0 — давление окружающей среды.

На рис. 3, 3 представлена вся совокупность экспериментальных результатов, полученная для различных r , r_n , E . Экспериментальные результаты были сгруппированы вблизи одинаковых значений параметра ξ . На рис. 3 приведены средние значения для каждой группы. В качестве погрешностей приведено среднеквадратичное отклонение от среднего для каждой группы точек. Максимальное значение I/W соответствует $\xi = 0,2 \div 0,3$; при дальнейшем увеличении ξ относительный импульс уменьшается, что связано с действием отрицательной фазы ударной волны. На больших расстояниях от центра взрыва импульс отрицательной фазы по величине больше импульса положительной фазы.

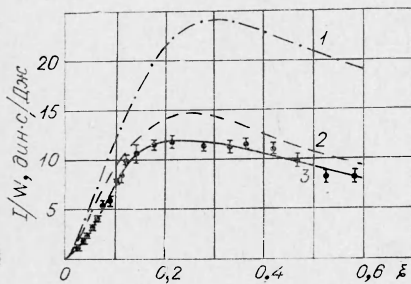


Рис. 3.

Для сравнения на рис. 3 приведена кривая 1 зависимости относительного импульса для точечного взрыва, полученного из известных решений [4], для случая $\gamma=1,4$; кривая 2, рассчитанная для неточечного безмассового

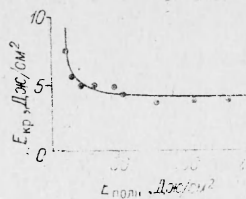


Рис. 2.

взрыва, получена И. Н. Ковалевой и И. В. Немчиновым, причем в этом расчете использовалось уравнение состояния воздуха, приведенное в таблицах [5].

Из сравнения экспериментальной и теоретической кривых следует, что по полному механическому импульсу лазерный взрыв подобен точечному взрыву. Эффективная энергия лазерного взрыва при этом составляет 0,75 энергии безмассового взрыва (если сравнивать с расчетной кривой при учете реального уравнения состояния воздуха).

Отличие эффективности, вероятно, связано с несколькими факторами. Во-первых, в теоретических расчетах не учитывается энергия, излучаемая нагретой до высоких температур центральной областью взрыва. Вторым фактором является рассеяние и отражение лазерного излучения плазменным факелом, которое не измерялось в обсуждаемых экспериментах. Кроме того, лазерный взрыв не мгновенен, и зона энерговыделения перемещается во времени навстречу падающему лучу, что приводит к несферичности плазменного факела, являющегося источником ударной волны. Асимметрия факела должна приводить к асимметрии ударной волны: в направлении навстречу лучу должна генерироваться более интенсивная ударная волна, чем вдоль облучаемой поверхности. Причем наиболее сильно это явление должно происходить при малых значениях.

В обсуждаемых экспериментах влияние асимметрии факела на величину измеренных импульсов отдачи в пределах точности экспериментальных результатов не проявилось. Вероятно, это связано со сравнительно малой длительностью лазерного импульса.

В заключение авторы благодарят П. В. Кевлишвили и И. В. Немчинова за полезные обсуждения и интерес к работе, а также выражают искреннюю признательность И. В. Немчинову и И. Н. Ковалевой за любезно предоставленные результаты своих расчетов безмассового взрыва.

*Поступила в редакцию
17/X 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Г. В. Склизков. Квантовая радиофизика, 1970, 52, 17.
2. A. N. Pirri, R. Schier, D. Wortham. Appl. Phys. Letters, 1972, 21, 3.
3. А. М. Бонч-Бруевич, Я. А. Имаси др. ЖТФ, 1968, 38, 5.
4. Д. Е. Охоцимский, И. Л. Кондрашева и др. Труды МИ им. В. А. Стеклова. Т. 50. М., Изд-во АН СССР, 1957.
5. Н. М. Кузнецов. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М., «Машиностроение», 1965.