

17. В. А. Пospelов. Численные методы механики сплошной среды, 1982, 13, 99.  
 18. А. А. Степанов, В. А. Щеглов. Кваптовая электропика, 1979, 6, 1476, 2476.  
 19. Б. П. Герасимов, Т. А. Ермилова, С. А. Семушин и др. Препринт ФИАН, № 58, М., 1983.

## ФИЗИКА РАЗРУШЕНИЯ И ВОПРОСЫ ТЕПЛООБМЕНА УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОТОКОМ АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. А. Лошкарев  
 (Ставрополь)

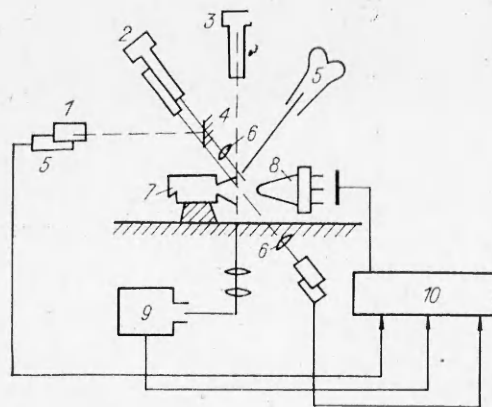
Применение углеграфитовых материалов в системах тепловой защиты теплоэнергетических установок в средах с большими тепловыми нагрузками обуславливается тем, что углерод обладает редким сочетанием необходимых физических свойств. По термическим свойствам графит является тепловым «демпфером» с очень высокой температурой плавления, по термохимическим обладает высокой теплотой сублимации [3, 6].

Модель теплозащитного покрытия, подвергнутого воздействию выскозонтальной газа, применительно к графитовым соединениям обычно основывается на непосредственном использовании классических представлений, в которых предполагается фазовое равновесие в системе твердое тело — газ. Вместе с тем, как показали результаты ряда экспериментальных исследований при сравнительно высоких тепловых потоках и низких давлениях, неравновесные процессы играют существенную роль при абляции таких покрытий.

Основная цель работы — создание экспериментального комплекса по исследованию физики и механизма разрушения углеграфитовых теплозащитных покрытий в потоке азотной плазмы в условиях воздействия импульсного лазерного излучения средней мощности с оценкой физико-химических неравновесных процессов в газовой и конденсированной фазах и влияния последних на абляционную стойкость материала в целом.

В условиях высокого радиационно-конвективного теплового потока ( $0,5-2 \text{ МВт/см}^2$ ), поддерживаемого импульсным лазерным излучением, картина взаимодействия падающего излучения с веществом существенно усложняется выбросом вещества в пограничный слой, заполнением последнего продуктами абляции и поглощением радиационной составляющей в видимой и инфракрасной областях спектра.

Принципиальная схема экспериментального комплекса представлена



на рис. 1. Он состоит из системы газодинамических испытаний, которая включает плазменный источник на базе азотно-водородного плазматрона ПГ-1,07, жестко скрепленного со станиной стенда, держателя образцов с одновременной заменой датчиками энтальпии и динамического напора; термодина-

Рис. 1. Принципиальная схема стенда. 1 — фотоприемники; 2 — лазер ЛГ-68; 3 — импульсный лазер ГОС-1001; 4 — делительные стекла; 5 — видеокамеры; 6 — линзы; 7 — плазматрон; 8 — держатель образцов; 9 — спектрограф ДФС-8-2; 10 — измерительный комплекс.

ную технику; комплекс лазерно-оптической аппаратуры (ударный импульсный лазер ГОС-1001, зондирующая лазерная система на базе плавно перестраиваемого лазера ЛЖИ-502 и аргон-криптонового лазера ЛГ-68, спектрограф ДФС-8-2 с фотоэлектрической приставкой, кремниевые фотодиоды ФД-7К, монохроматор МРД-23, оптические линзы из ВаF<sub>2</sub> и стекла марки ЛК-3 и ТФ-5) и комплекса измерительной аппаратуры — на базе осциллографов типа С1-17, С1-18, одно- и двухкоординатных самописцев типа «Endim» (тип. 621.02; 620.04).

Лазер ГОС-1001 с острой фокусировкой на исследуемое покрытие позволил получить мощность ударного радиационного импульсного теплового потока  $\sim 3,7 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм. В процессе эксперимента этот импульс подавался на каждый последующий исследуемый материал в интервале времени  $\tau = 10$  с. Максимальное время эксперимента в потоке азотной плазмы составило  $\sim 60$  с. Испытанию подвергали два типа материалов на основе углерод-углеродной композиции с высокомолекулярными углеродными волокнами и пироуглеродной матрицы с пропиткой и без. Образцы выполнялись в виде полусфер радиусом 5 мм с диаметрными каналами для заделки термопар. Высокоэнтальпийный поток азотной плазмы, предварительно проградуированный с помощью нестационарных датчиков теплового потока, энтальпии и динамического напора вдоль оси струи, позволили получить максимальные значения:  $T = 4800$  К,  $q = 2$  МВт/см<sup>2</sup>,  $v = 80$  м/с. Отношение выходного диаметра сопла плазматрона к диаметру исследуемого образца равно трем. Такое соотношение соответствовало равномерному газодинамическому обтеканию.

Физико-химические процессы в газовой фазе пограничного слоя на атомно-молекулярном уровне между парами абляции исследуемого материала и потоком азотной плазмы оценивались по данным спектрофотометрического анализа с учетом методики поэтапного подхода, разработанного в [1—3]. Оптическая схема лазерного зондирования пограничного слоя на поверхности разрушения с целью оценки коэффициентов поглощения лучистой составляющей состояла из плавно перестраиваемого узкополосного лазера на красителе ЛЖИ-402.

Введение этой системы в общую схему эксперимента позволило излучение лазера непрерывно и равномерно сканировать по частоте при помощи электродвигателя, поворачивающего посредством редуктора поляризационно-интерференционный фильтр ЛиО, селективирующий по длинам волн генерацию. Такое сканирование осуществляется для каждого положения образца покрытия в высокоэнтальпийном потоке относительно зондирующего луча с наперед заданным шагом перемещения по толщине пограничного слоя. Излучение, прошедшее через пограничный слой, направляется в компенсационное устройство, которое собирает лучи, отклонившиеся от основного направления за счет «эффекта тепловой линзы» пограничного слоя, затем на площадку фотоприемника и далее на осциллограф. Зондирование проводилось также по отдельным длинам волн с помощью аргон-криптонового лазера ЛГ-68.

Мощность излучения стабилизировали охлаждением резонаторов лазера, а также введением известной оптической системы с использованием светоделительного кубика, фотодиода, поляризационной пластины, которая позволила при инерционности порядка секунды обеспечить стабильность с точностью  $\sim 0,02\%$  в течение пяти минут. Дрейф выходной мощности лазера, погрешности градуировки приемника излучения и ошибки измерения в совокупности ограничивают точность полученных данных по коэффициентам поглощения величиной  $\sim 10\%$ .

Методика проведения эксперимента связана с оценкой уноса массы исследуемого материала в условиях газодинамического обтекания без возмущения и с ним. Коэффициенты поглощения лазерного излучения измеряли в локальных областях на поверхности полусферы в точке с углом раствора  $\alpha = 40^\circ$  на расстояниях от поверхности  $\Delta = 1; 1,8$  мм.

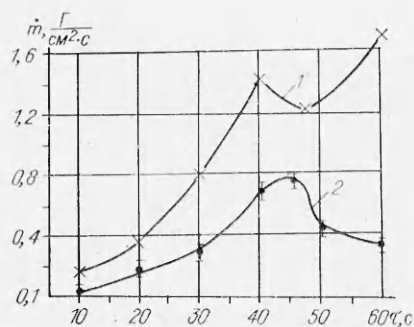


Рис. 2. Кривые изменения уноса массы при воздействии (1) и без воздействия лазерного излучения (2).

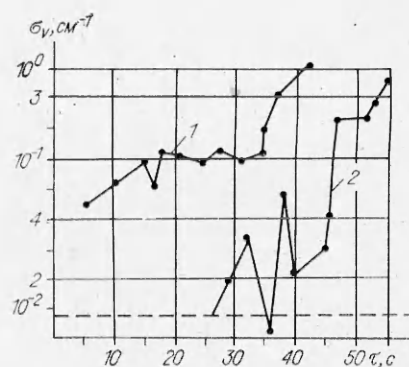


Рис. 3. Изменение коэффициента поглощения лазерного излучения;  $\lambda = 0,63$  мкм.  $\Delta$ , мм: 1 — 1, 2 — 1,8.

Экспериментальное исследование материалов на основе углерод-углеродной композиции с пропиткой и без проводили в два этапа. На первом этапе образцы подвергали испытанию в потоке азотной плазмы, на втором — в условиях лазерного воздействия. В экспериментальных условиях нагрева с плотностью теплового потока  $q = 1,4 \div 2$  МВт/см<sup>2</sup> без воздействия импульсного лазерного излучения процесс абляции исследуемых материалов является одномерным и стационарным. Радиальная теплопроводность не успевает значительно повлиять на теплообмен. Поглощение теплового потока в короне — ожоговом слое на поверхности — незначительно. Интенсивность сублимационной инжекции (массовой скорости абляции) имеет пикообразную форму с последующим уменьшением, что сказывается и на характере поглощения лазерного излучения при зондировании пограничного слоя. На рис. 2, 3 показаны эти изменения. При температуре поверхности  $T_w = 4000$  К плавление не наблюдается, скалывание короны не происходит.

Введение дополнительной составляющей в радиационный тепловой поток за счет действия лазерного излучения с интенсивностью  $\sim 3,7 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> приводит к выбросу газообразной массы вещества, кратерообразованию на поверхности, скалыванию без растрескивания короны с характерным наплывом по краям и запылению пограничного слоя. В качестве примера на рис. 3 показаны результаты лазерного зондирования пограничного слоя при  $\lambda = 0,63$  мкм на расстояниях 1 и 1,8 мм от поверхности. Характер изменения  $\sigma = f(\tau)$  для  $\Delta = 1$  мм начинает проявляться уже при  $\tau = 4$  с с постепенным ростом и достижением максимальной величины к  $\tau = 40$  с. При  $\Delta = 1,8$  мм наблюдаются резкие флуктуации  $\sigma$ . Рост  $\sigma$  наблюдается лишь к  $\tau = 27$  с с появлением «окоп прозрачности» при  $\tau = 33 \div 36$  с с дальнейшим увеличением.

Такое поведение  $\sigma$  следует объяснить тем, что в начальной стадии эксперимента вдув паров абляции исследуемого покрытия проявляется более сильно в нижних слоях. В дальнейшем, с ростом вдува, пары абляции заполняют и лежащие выше слои, попадающие в створ лазерного луча с перетяжкой 0,08 мм, а колебания  $\sigma$  в этих слоях обусловлены турбулентными флуктуациями потока. Спектрофотометрический анализ по составу компонентов паров абляции показал присутствие молекул  $C_2$ ,  $C_3$ , CN, SP; для  $C_2$  —  $\lambda = 5635,5$  Å, 5165,2, 5129,3, 4737, 4715,2, 4697,6, 4684,8 и 5555,5 Å; для  $C_3$  — в области 4050,0 Å; для CN — в области 3871,4; 3861,9 Å; для SP — в области 3872,0; 4312,5 Å.

Присутствие названных соединений в газовой фазе пограничного слоя сказывается на поглощении лучистой составляющей падающего теплового потока. Например, при зондировании этих слоев с помощью плавно перестраиваемого лазера на красителе ЛЖИ-402 и аргон-криптонового лазера ЛГ-68 наибольшее поглощение обусловлено молекулами

$C_3$ . Оценка проведена при сравнении данных по сечению поглощения как отношению спектрального коэффициента поглощения к предполагаемой числовой плотности молекул [4, 5].

Интересны результаты по механизму и физике разрушения исследуемых покрытий в потоке азотной плазмы в условиях лазерного воздействия. Интенсивные ожоговые явления в области лазерного удара связаны с выбросом облака газообразных продуктов в более холодные верхние слои пограничного слоя. Облако сносится потоком плазмы с конденсацией и выпадением на поверхность, при этом ожоговое пятно принимает форму вытянутого эллипса с осью в точке кратера в направлении движения потока. Ожоговое пятно укрепляет поверхность и препятствует инжекции газообразных продуктов.

Микроскопическая обработка образцов после испытания показала наличие выступа площадки в области пятна относительно поверхности, не подверженной воздействию лазерного излучения. Характер кратерообразования связан с разрывом нитей углерода, имеет неправильную серповидную форму с углублением от 1,2 до 1,9 мм соответственно для материала с пропиткой и без. В момент лазерного удара с фокусировкой в диаметре 2 мм при плотности лучистой составляющей потока  $\sim 3,7 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> с импульсом  $\tau \sim 10^{-3}$  с замечена задержка выброса облака по данным скоростной фотосъемки с интервалом  $\sim 10^{-2}$  с. Визуально яркость излучения в области удара превышала яркость образца в плазменном потоке. К сожалению, из-за инерционности оптическая техника измерения не успела зафиксировать температуру поверхности в момент выброса, но по оценке яркостей можно предположить локальное увеличение температуры на порядок и выше.

Результаты экспериментальных исследований по массовой скорости уноса (абляции) в потоке азотной плазмы сравнивались с равновесной моделью сублимации Кнудсена — Ленгмюра. Расчеты выполнены для внешнего давления 1 атм с использованием данных по термодинамическим свойствам для молекул  $C_2$  и  $C_3$  [5] с варьированием коэффициента аккомодации в пределах значений 0,16; 0,013; 0,24; 0,5 и 0,023.

Давление насыщенного пара рассчитывалось по уравнению Клапейрона — Клаузиуса в соответствии с [4]. Расчетная кривая не показала пикообразной формы в сравнении с экспериментом, а разброс данных по массовой скорости уноса превышал 40%. Основная причина такого различия связана с резким увеличением разницы давлений насыщенных паров при температуре поверхности и паров абляции над поверхностью, а также температуры поверхности в момент лазерного удара. Кроме того, расчет проведен при условии, что в газовой и конденсированной фазах компоненты углерода находятся в равновесном состоянии.

Итак, в работе описан экспериментальный комплекс для испытания теплозащитных покрытий в потоке азотной плазмы с одновременным исследованием абляционной стойкости, газофазных процессов в пограничном слое в условиях импульсного лазерного воздействия с влиянием последних на высоконтальный тепло- и массообмен, эффектов радиационной блокады в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, механизмов и физики разрушения.

Сравнением расчетных результатов с экспериментом показана необходимость разработки неравновесной модели разрушения с учетом газофазных химических процессов между «парами» абляции и компонентами набегающего потока. Модель Кнудсена — Ленгмюра при использовании коэффициентов аккомодации [5] не может предсказать эффекта конденсации, т. е. не учитывает фазовых переходов.

Спектральный лучистый поток, падающий на исследуемый материал при дискретном и непрерывном распределении, сильно зависит от концентрации компонентов  $C_2$  и  $C_3$  в пограничном слое. Сильное поглощение молекулами  $C_3$  позволяет не учитывать вклад молекулы  $C_2$ , поскольку спектральные области, в которых эти соединения блокируют большую часть лучистого потока, различаются слабо.

При сублимации материала на основе углерод-углеродистой композиции с высокомолекулярными волокнами и пироуглеродной матрицы без пропитки в потоке азотной плазмы концентрация  $C_3$  соответствует  $\sim 3,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , в условиях лазерного воздействия  $\sim 9,21 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Отмечен эффект конденсации паров углерода и упрочнения поверхности продуктами конденсации в области ожоговых пятен, а также максимальное поглощение лучистой составляющей падающего потока на многоатомных молекулах типа  $C_3$ .

Поступила в редакцию 28/V 1984,  
после доработки — 21/II 1985

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Лошкарев.— В кн.: Тепло- и массообмен. Т. 10, ч. 1. Минск, 1973.
2. В. А. Лошкарев. ФГВ, 1977, 13, 6.
3. А. Т. Никитин, В. А. Лошкарев. Теплозащитные покрытия в динамике сплошных сред. Ростов-на-Дону, 1982.
4. Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
5. JANNAF Thermochemical Tables. Dow Chemical Co, Midland, Mich, 1969.
6. А. М. Гришин. Математическое моделирование нестационарных аэротермохимических процессов. Томск, 1973.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОСТРОУГОЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ПЛАСТИН

С. М. Васильев, В. И. Курко  
(Красноярск)

Исследование газодинамических течений в условиях остроугольной геометрии сталкивающихся пластин представляет интерес в связи с разработкой новых типов взрывных источников плазмы, работой взрывомагнитных генераторов и изучением воздействия плазмы на металлы при сварке взрывом. Течение в зазоре между сталкивающимися пластинами и тепловое воздействие ударно-сжатого газа на поверхность этих пластин при скорости детонации ВВ до 5 км/с исследовались в [1—3].

В работе проведены эксперименты по изучению динамики накопления сгустка ударно-сжатого газа, образующегося при метании пластины на подложку скользящей детонационной волной, которая распространялась со скоростью  $u_0 > 6$  км/с. Скорость детонации выбрана выше скорости звука в материалах пластины и подложки, что обеспечивало отсутствие генерации частиц и кумулятивных струй из области точки контакта [4, 5].

Схема экспериментов приведена на рис. 1. Иницирующая пашка 2 с электродетонатором 1 устанавливалась на плоский заряд пластического ВВ 3, который приклеивался к алюминиевой пластине 6. Пластина с зарядом помещалась на боковые стенки составной кюветы 11 с дном (подложкой) 10 из оргстекла, алюминия или стали. С торцевой

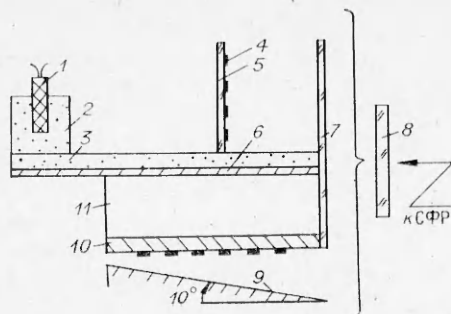


Рис. 1. Схема экспериментального исследования динамики процесса накопления сгустка ударно-сжатого газа при параллельной схеме метания пластины скользящей детонационной волной.