

## ЛИТЕРАТУРА

1. Еремин А. В., Кочнев В. А., Куликовский А. А., Набоко И. М. Нестационарные процессы при запуске сильно недорасширенных струй // ПМТФ.— 1978.— № 1.
2. Белавин В. А., Голуб В. В., Набоко И. М. Структура импульсных струй газов, истекающих через сверхзвуковое сопло // ПМТФ.— 1979.— № 1.
3. Чекмарев С. Ф., Станкус Н. В. Газодинамическая модель и соотношения подобия для запуска сверхзвуковых сопел и струй // ЖТФ.— 1984.— Т. 54, № 8.
4. Добрынин Б. М., Кисляков В. Б., Масленников В. Г. Интерферометрическое исследование начального участка сверхзвуковых недорасширенных струй газов с различным отношением удельных теплоемкостей, истекающих из конических сопел // ЖТФ.— 1980.— Т. 50, № 2.
5. Емельянов А. В., Еремин А. В., Набоко И. М. Локальное электронно-пучковое исследование процесса формирования импульсной струи // Тр. IX Всесоюз. конф. по динамике разреж. газов.— Свердловск: Изд-во Уральск. ун-та, 1988.— Т. 3.
6. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. Газодинамика процессов истечения.— Новосибирск: Наука, 1984.
7. Кудрявцев Н. Н., Новиков С. С., Светличный И. Б. Экспериментальное определение температуры уровня 001 молекулы углекислого газа в неравновесном потоке смесей  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2(\text{He})$  // ФГВ.— 1977.— Т. 13, № 2.
8. Eremín A. V., Ziborov V. S., Naboko I. M. Experimental study of optical features of shock-heated jets // Optical methods of fluids and solids.— Berlin e. a.: Springer, 1985.
9. Ачасов О. В., Кудрявцев П. Н., Новиков С. С. и др. Диагностика неравновесных состояний в молекулярных лазерах.— Минск: Наука и техника, 1985.
10. Пеннер С. С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов.— М.: ИЛ, 1963.
11. Гордиец Б. Ф., Осипов А. П., Шеленин Л. А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры.— М.: Наука, 1980.
12. Сковородко П. А. Колебательная релаксация в свободной струе углекислого газа // Некоторые задачи гидродинамики и теплообмена.— Новосибирск: Наука, 1980.
13. Amman H. O. Experimental study of the starting process reflection nozzle // Phys. Fluids.— 1969.— V. 12, N 5.

г. Москва

Поступила 7/III 1989 г.

УДК 536.422.4

А. Г. Гнедовец, Е. Б. Кульбацкий, С. В. Селищев, А. Л. Смирнов,  
А. А. Углов

### ДИНАМИКА ФРОНТА КОНДЕНСАЦИИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ МЕТАЛЛОВ В ГАЗАХ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Адиабатическое расширение паров мишени в вакуум при действии лазерного излучения умеренной интенсивности на твердые мишени сопровождается конденсацией пара в капли, при этом вблизи поверхности формируется конденсационный скачок [1]. В результате лазерного испарения материалов в газовой среде повышенного давления (0,1—10 МПа) также образуется конденсированная фаза [2]. При лазерном облучении оксидов в восстановительной газовой среде можно найти условия, когда конденсированная фаза состоит в основном из металлических частиц.

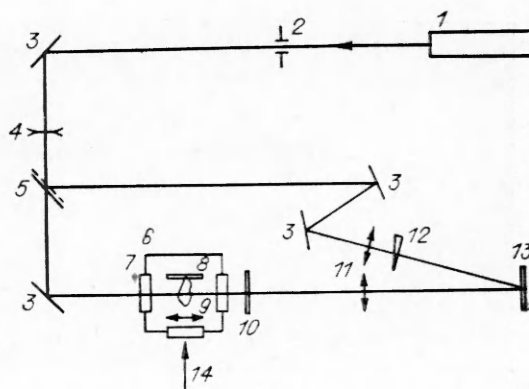
Эффективность физико-химических процессов лазерного восстановления оксидов в восстановительных газовых средах повышенного давления в значительной мере определяется характером газодинамических течений многофазных парогазовых смесей. Исследование динамики приповерхностной многофазной среды при воздействии лазерного излучения (ЛИ) на материалы в газах повышенного давления методом скоростной фоторегистрации показало, что характер течений в значительной мере зависит от давления и рода газа, плотности потока ЛИ и т. д. [3, 4]. Однако методом скоростной фоторегистрации не удается в деталях изучить процесс образования дисперсной фазы в области конденсации. Не удается установить и зависимость пространственно-временных характеристик области конденсации от давления газа, энергетических параметров ЛИ и т. п. Более того, остается неясным, когда начинается конденсация — во время действия ЛИ на материал или после окончания его.

В данной работе показано, что в парогазовом облаке возникает фронт конденсации, аналогичный конденсационному скачку. Методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии исследована динамика фронта конденсации при действии лазерного излучения на мишень в газе повышенного давления.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Излучение диагностирующего рубинового лазера 1, проходя через диафрагму 2, расширяется отрицательной линзой 4, делится на предметный и опорный

© 1990 Гнедовец А. Г., Кульбацкий Е. Б., Селищев С. В., Смирнов А. Л.,  
Углов А. А.

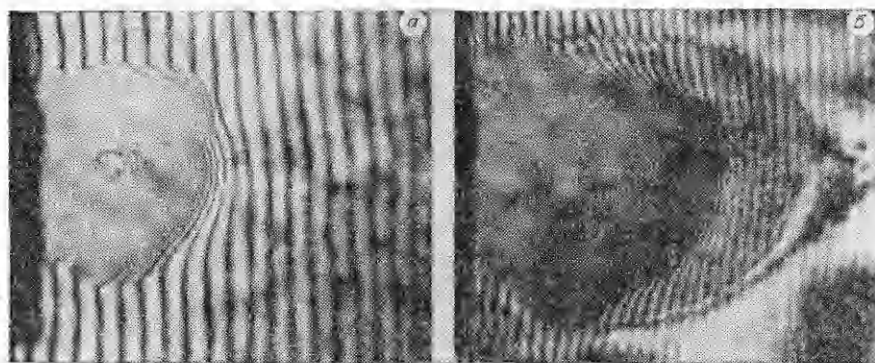
лучи полупрозрачным зеркалом 5 и направляется на фотопластинку 13 зеркалами 3. Предметный луч проходит через окна 7 камеры повышенного давления 6 и зондирует парогазовое облако 9. Изображение парогазового облака через светофильтр 10 строится на фотопластинке объективом 11. В опорный пучок также помещается объектив и поворотный клин 12. Излучение импульсного неодимового лазера (20—50 Дж, длительностью 1,5 мс) фокусируется на мишени 8 из триоксида вольфрама в пятно диаметра 2—6 мм линзой 14 с фокусным расстоянием 270 мм. Интенсивность ЛИ менялась в пределах  $10^9$ — $10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Рубиновый лазер излучал импульсы в режиме модулированной добротности с энергией 0,3 Дж и длительностью 20 нс. Схема синхронизации обеспечивала точность положения диагностирующего импульса рубинового лазера относительно импульса неодимового лазера не хуже 5 мкс. Голографический интерферометр позволил получить разрешение по полю визуализации не менее 50 мкм. Голографические интерферограммы после восстановления обрабатывались численными методами. Мишени изготавливались в виде пластин размером  $10 \times 15 \times 1$  мм и помещались в камеру повышенного давления. Камера неоднократно продувалась и наполнялась водородом до давлений 0,1—5,0 МПа. В результате экспериментов получена серия голограмм, отражающих динамику процесса лазерного восстановления металлов.



Р и с. 1

Выделим несколько основных этапов процесса лазерного восстановления металлов. Первый — нагрев мишени и испарение триоксида вольфрама с формированием парогазового облака. Восстановление триоксида вольфрама до металлического вольфрама происходит в основном в парогазовой фазе. Второй этап — формирование фронта конденсации, третий — релаксация. Первый этап длится примерно 150 мкс. Скорость разлета паров на этом этапе в зависимости от режима облучения  $5 \cdot 10^3$ — $10^4$  см/с. Второй этап начинается через 1500 мкс после окончания импульса ЛИ. Релаксация занимает еще примерно 2—3 мкс. Особенностью процесса лазерного испарения материалов в газах повышенного давления является изменение характера истечения паров мишени в зависимости от давления. Так, например, для давлений окружающего газа меньших или равных 1 МПа наблюдается струйный характер истечения паров мишени. При повышении давления происходит смена механизма разлета паров, и для давлений, больших 1 МПа, пары распространяются диффузионным образом.

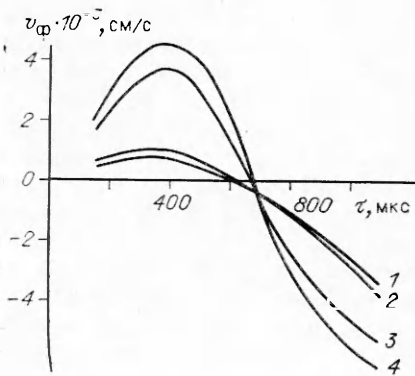
Интерферограммы процесса лазерного восстановления приведены на рис. 2. На интерферограмме рис. 2, а, соответствующей моменту времени 150 мкс, визуализировано облако паров мишени. Характерное положение фронта конденсации показано на интерферограмме рис. 2, б. На всех интерферограммах область, занятая парогазовой фазой, отличается увеличением показателя преломления по сравнению со свободным полем визуализации, что связано в основном с увеличением концентрации атомов вольфрама. Уменьшение показателя преломления в области, занятой парогазовой фазой, за фронтом конденсации (рис. 2, б) может вызываться уменьшением плотности парогазовой смеси за счет формирования ударной волны, конденсации пара или из-за наличия электронной компоненты, вклад которой в изменение показателя преломления отрицательный, т. е. увеличение концентрации электронов влечет за собой уменьшение показателя преломления. Последнее может вызываться совокупностью всех этих причин.



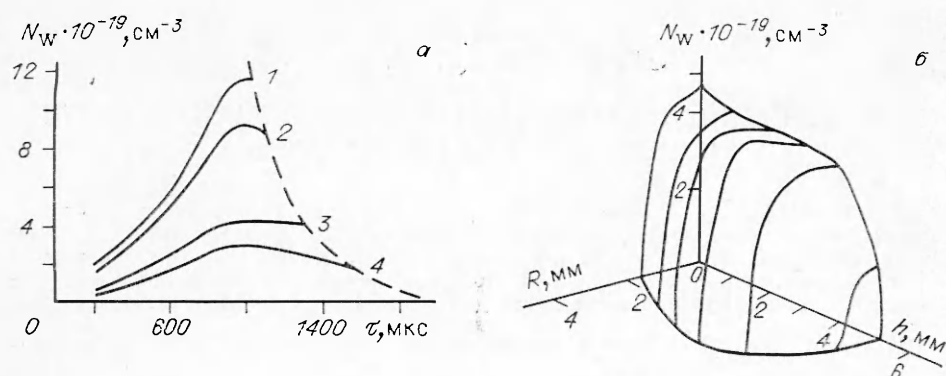
Р и с. 2

Отметим, что ударные и звуковые волны на голограммах визуализированы не были. Кроме того, направление движения фронта совпадает с направлением градиента температурного поля в парогазовой фазе. Это позволило установить, что наблюдаемый фронт — фронт конденсации.

Фронт конденсации возникает на периферии парогазового облака, где парогазовая фаза охлаждается и пересыщается. Его движение при  $p \leq 1$  МПа, т. е. в случае струйного истечения паров, отличается от движения при  $p > 1$  МПа при диффузионном разлете. Главная особенность в том, что при струйном истечении паров фронт конденсации, перпендикулярный оси действия ЛИ, не имеет четких очертаний. В этом случае он четко очерчен только на границе парогазового облака, располагаясь параллельно оси действия ЛИ. Фронт конденсации при диффузионном распространении паров мишени в ранние моменты повторяет очертания границы парогазового облака, спрямляясь к окончанию ЛИ. Таким образом, при  $p \leq 1$  МПа фронт конденсации движется по радиусу в направлении от оси парогазового облака, когда облако расширяется первые 600—700 мкс, и затем — к оси парогазового облака, когда скорость расширения облака становится меньше,  $\sim 10^2$  см/с. При  $p > 1$  МПа фронт конденсации сначала движется в направлении от мишени, пока растет скорость разлета парогазового облака и не становится равной скорости фронта конденсации. Затем он меняет направление движения на противоположное и начинает двигаться к поверхности мишени. Скорость фронта увеличивается до  $12 \cdot 10^3$  см/с. Зависимость изменения скорости фронта конденсации, измеренной относительно оси ЛИ (1, 2 — 0,1; 0,5 МПа) и относительно поверхности мишени (3, 4 — 4; 5 МПа), от времени показана на рис. 3. Перемена знака скорости наступает в момент времени 600—700 мкс. После окончания ЛИ (1500 мкс) скорость фронта конденсации увеличивается до значений, больших  $20 \cdot 10^4$  см/с, за период времени, меньший 5 мкс ( $p > 1$  МПа). При  $p \leq 1$  МПа и струйном характере истечения паров оценить скорость фронта конденсации после окончания ЛИ не удалось, так как свободная от конденсата парогазовая фаза конденсируется настолько быстро, что достоверно не удалось разрешить по времени момент схлопывания парогазовой области. Процесс конденсации длится после окончания ЛИ в исследуемом диапазоне давлений не более 2—5 мкс. За это время формируется менее 30 % (по объему) конденсата. Изменение концентрации атомов вольфрама в парогазовой фазе (а) и распределение атомов вольфрама в парогазовой фазе для  $p = 4$  МПа



Р и с. 3



Р и с. 4

в пяти сечениях от поверхности мишени (б) показано на рис. 4. Штриховой линией на рис. 4, а обозначено положение фронта конденсации в зависимости от времени и давления газа, концентрация атомов вольфрама за фронтом конденсации уменьшается по оценкам в 20—40 раз. Кривые соответствуют давлениям 0,1; 0,5; 4; 5 МПа. Концентрация атомов вольфрама рассчитана в точке, находящейся на расстоянии 2 мм от поверхности мишени по оси ЛИ. Выбор координаты определялся удобством обработки голографических интерферограмм. При расчете профилей (рис. 4, б) предполагалось, что парогазовое облако имеет осевую симметрию, ЛИ здесь действует по оси  $OY$ .

Таким образом, голографическая интерферометрия лазерного восстановления триоксида вольфрама в водороде показала, что процесс конденсации в качественном отношении сохраняет основные физико-химические закономерности конденсации при лазерном испарении материала в нормальных условиях или при достаточно разреженной атмосфере. Так, визуализированный фронт конденсации аналогичен скачку конденсации [1], который возникает при лазерном испарении в вакуум. Особенность лазерного восстановления металлов в восстановительной атмосфере повышенного давления в том, что при  $p \leq 1$  МПа наблюдается струйное истечение паров и фронт конденсации выражен неярко, при  $p > 1$  МПа пары распространяются диффузионным образом, фронт конденсации резко очерчен, направление его движения совпадает с направлением градиента температурного поля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов С. П., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. Действие излучения большой мощности на металлы.— М.: Наука, 1970.
2. Углов А. А., Гнедовец А. Г., Кульбацкий Е. Б. Конденсация тяжелого пара на частицах в атмосфере легкого газа // Физика и химия обработки материалов.— 1985.— № 4.
3. Кульбацкий Е. Б., Селищев С. В. Влияние угла падения луча на воздействие приповерхностной лазерной плазмы на графит // Физика и химия обработки материалов.— 1987.— № 5.
4. Пряхин С. С., Роянов А. А., Селищев С. В. Динамика приповерхностной лазерной плазмы в газах повышенного давления // Физика и химия обработки материалов.— 1987.— № 4.

г. Москва

Поступила 17/II 1989 г.