

СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПРОТЕКАНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*В. А. Бобырев, Ф. В. Бункин, Н. А. Кириченко,
Б. С. Лукьянчук, А. В. Симакин*

Сообщается об экспериментальном наблюдении нового типа квазистационарного режима в неизотермических гетерогенных реакциях стохастического горения под действием непрерывного лазерного излучения. Обсуждаются физические причины этого явления. Показано, что стохастизация горения возникает при острой фокусировке излучения на поверхность мишени и обусловлена появлением в рассматриваемой нелинейной системе новых степеней свободы, связанных с пространственной неоднородностью задачи.

В последние годы интенсивно изучаются термохимические процессы, инициированные лазерным излучением. К их числу относится лазерное воспламенение и горение металлов в окислительной среде [1]. В процессе лазерного воспламенения взаимосвязанным образом изменяются скорость окислительной реакции, мощность ее энерговыделения и поглощательная способность поверхности металла с нарастающим на ней слоем окисла. Сложная тепловая динамика таких процессов обусловлена как наличием положительной обратной связи, приводящей к термохимической неустойчивости [2], так и особенностями изменения поглощательных характеристик поверхности [2 — 4].

Из результатов, проведенных до настоящего времени исследований по лазерному горению металлов следовало, что процесс развития термохимической неустойчивости завершается выходом системы на стационарный режим (или установлением в ней автоколебаний). Аналогичные явления характерны и для ряда других неравновесных систем, в которых протекают химические реакции (см., например, [5, 6]).

В настоящей работе сообщаются результаты экспериментально наблюдавшегося нового типа квазистационарного режима в гетерогенных реакциях — лазерного стохастического горения. В теории нелинейных колебаний подобный тип движений динамической системы на фазовой плоскости соответствует так называемому "странному аттрактору" [7].

Нами экспериментально исследовалась динамика нагрева титановых мишеней непрерывным излучением CO_2 -лазера мощностью $P = 18$ Вт. Мишени имели цилиндрическую форму, толщина их изменялась в пределах $0,5 \div 1,5$ мм, диаметр $2 \div 5$ мм, масса $30 \div 100$ мг. Эксперименты проводились по методике, описанной в [2]. Температура мишени $T(t)$ измерялась с помощью термопары хромель — алюмель, которая приваривалась к тыльной стороне мишени. Величина $T(t)$ и ее производная dT/dt (на выходе дифференцирующей RC-цепочки с постоянной времени $\tau \approx 0,02$ сек) регистрировались с помощью шлейфового осциллографа Н-115.

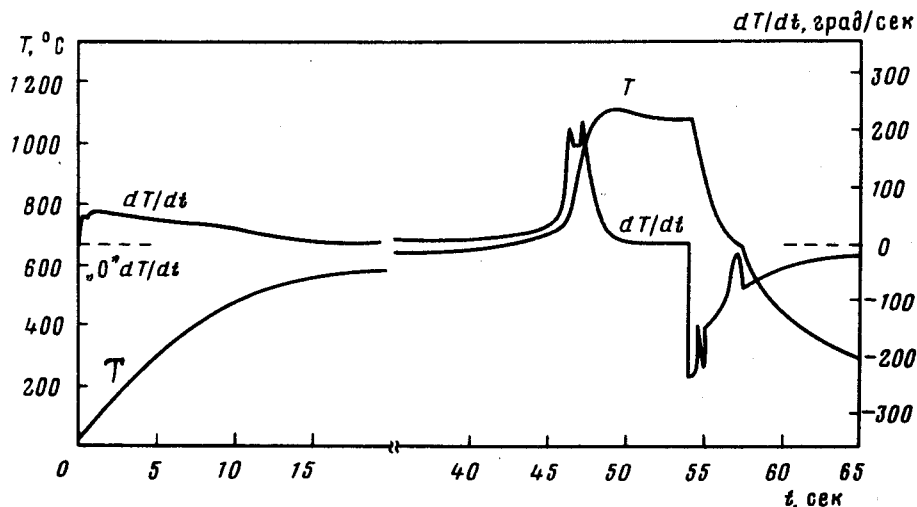


Рис.1. Экспериментальная осциллограмма сигналов $T(t)$ и dT/dt , полученная при воспламенении титановой мишени диаметром 4мм, массой $m = 43,1$ мг при равномерной засветке поверхности непрерывным лазерным излучением ($P = 18$ Вт). Лазер выключался в момент времени $t = 54$ сек

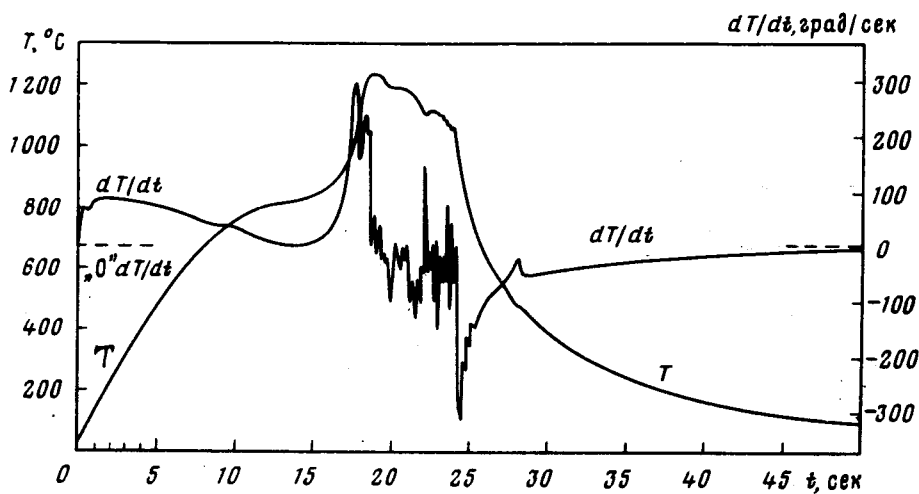


Рис.2. Экспериментальная осциллограмма сигналов $T(t)$ и dT/dt , полученная при острой фокусировке непрерывного излучения ($P = 18$ Вт) на мишень. Параметры мишени: диаметр 4мм, масса $m = 50,5$ мг. Лазер выключался при $t = 24$ сек

При достаточно равномерной засветке мишени типичные осциллограммы нагрева и горения имели вид, представленный на рис.1. Особенности воспламенения и горения титана в таких условиях исследовались в [3; 4, 8]. Существенно, что в случае, представленном на рис.1 и во всех аналогичных экспериментах после воспламенения быстро устанавливался стационарный режим (на рис.1 при $t > 50$ сек $dT/dt \approx 0$). Кро-

ме того, нами было экспериментально установлено, что поглощательная способность мишени быстро выходит на свое асимптотическое значение, определяющееся оптическими константами окисла, а процесс испарения окисной пленки при этих температурах практически не происходит.

При уменьшении размеров фокусного пятна, когда его размеры оказывались много меньше радиуса мишени, наблюдался переход к режиму, в котором темп нагрева изменялся случайным образом (производная dT/dt совершала хаотические колебания) (см. рис.2). Такой режим горения наблюдался в достаточно широком диапазоне параметров мишени. Предварительный спектральный и корреляционный анализ зависимости $dT(t)/dt$ подтверждает ее стохастический характер.

Как известно из теории нелинейных колебаний [7], для возникновения стохастичности система должна обладать более чем двумя степенями свободы. Отсюда следует, что при равномерной засветке термически тонкой мишени лазерным излучением стохастичность не должна проявляться, так как нагрев такой мишени с хорошей точностью описывается системой двух нелинейных дифференциальных уравнений

$$mc \frac{dT}{dt} = PA(x) - P_{\text{ПОТ}}(T) + \rho s w \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d}{x} \exp\left(-\frac{T_d}{T}\right), \quad T|_{t=0} = T_H, \quad x|_{t=0} = x_H$$

Здесь x — толщина окисной пленки, $A(x)$ — поглощательная способность мишени [2], $P_{\text{ПОТ}}(T)$ — мощность теплопотерь, m — масса, ρ — плотность, s — удельная теплоемкость, s — полная площадь поверхности мишени, w — удельная теплота энерговыделения реакции, d и T_d — константы закона окисления. При острой фокусировке излучения существенную роль начинают играть эффекты радиальной теплопроводности. Действительно, прямые измерения показали, что различие температур в центре мишени и на периферии в наших экспериментах составляло $\Delta T = 50 \div 250^\circ \text{C}$. В соответствии с этим при острой фокусировке излучения вместо уравнения теплового баланса (первое уравнение в (1)) следует писать полное уравнение теплопроводности. Тогда задача превращается в распределенную, что означает появление в системе более чем двух степеней свободы. Эти степени можно явно выделить, приближенно сводя задачу к системе конечного числа обыкновенных дифференциальных уравнений. В простейшем случае задачу можно свести к системе уравнений для температур и толщин окисных слоев (или мощности энерговыделения реакции) в центре мишени и на периферии. Качественно причина появления стохастичности связана с сильной нелинейной зависимостью мощности энерговыделения от температуры и наличием теплопроводностного запаздывания. Время этого запаздывания $\tau_T \sim R^2/a$ (R — радиус, a — коэффициент температуропроводности мишени) составляет $\tau_T \sim 0,1 \div 0,3$ сек, что хорошо согласуется с периодом осцилляций величины dT/dt в наших экспериментах. Более подроб-

ный, количественный анализ экспериментов с детальным численным интегрированием уравнений динамики нагрева будет приведен в дальнейшем. Здесь же отметим, что рассмотренная выше задача дает важный пример реализации относительно простой физической системы, в которой появляются стохастические колебания.

Таким образом, нами впервые экспериментально обнаружен стохастический режим протекания термохимических реакций под действием лазерного излучения. Хотя это явление обнаружено в гетерогенных процессах, легко понять, что аналогичные эффекты могут возникать и при лазерном стимулировании гомогенных реакций.

Авторы благодарны Ю.А.Кравцову, А.М.Прохорову, М.И.Рабиновичу за полезные обсуждения.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева АН СССР

Поступила в редакцию
2 октября 1980 г.

Литература

- [1] М.И.Арзуов, А.И.Барчуков, Ф.В.Бункин, В.И.Конов, Б.С.Лукьянчук. Квантовая электроника, 6, 1339, 1979.
- [2] М.И.Арзуов, А.И.Барчуков, Ф.В.Бункин, Н.А.Кириченко, В.И.Конов, Б.С.Лукьянчук. Квантовая электроника, 6, 466, 1979.
- [3] А.М.Бонч-Бруевич, М.Н.Либенсон, В.С.Макин, С.Д.Пудков, И.И.Иванова, М.К.Коченгина. Письма в ЖТФ, 4, 921, 1978.
- [4] В.И.Бойко, Ф.В.Бункин, Н.А.Кириченко, Б.С.Лукьянчук. ДАН СССР, 250, 78, 1980.
- [5] К.Г.Шкадинский, Б.И.Хайкин, А.Г.Мержанов. Препринт ИХФ АН СССР, М., 1970.
- [6] В.В.Вольтер, И.Е.Сальников. Устойчивость режимов работы химических реакторов. М., "Химия", 1972.
- [7] А.В.Гапонов-Грехов, М.И.Рабинович. УФН, 128, 579, 1979.
- [8] И.Н.Гончаров, А.А.Горбунов, В.И.Конов, А.С.Силенок, Ю.А.Скворцов, В.Н.Токарев, Н.И.Чаплиев. Препринт ФИАН, №76, М., 1980.
- [9] В.А.Васильев, Ю.М.Романовский, В.Г.Яхно. УФН, 128, 625, 1979.