

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ВЗРЫВНОГО РАСПАДА АЦЕТИЛЕНА

В. К. Битюцкий, М. А. Гликин

Изучению процесса разложения ацетилена, характер протекания которого сходен с процессом горения, посвящено большое количество работ, нашедших отражение в [1, 2]. Установлено, что взрывной распад ацетилена может протекать в дефлаграционном и детонационном режимах. Причем под термином «дефлаграция» подразумеваются и пламена, распространяющиеся с непостоянной скоростью.

В ряде случаев процесс разложения ацетилена сопровождается сверхвысокими давлениями, в 300—400 раз превышающими начальное [3—7]. В [3—4] реализацию сверхвысоких давлений связывают с возможностью возникновения детонации в ударно-сжатом газе у торца трубы под действием отраженной волны и называют это явление нестационарным режимом быстрого горения. В работе [5] образование таких давлений объясняется каскадным эффектом, зависящим от соотношения между длиной трубопровода и величиной преддетонационного расстояния в условиях эксперимента. Необходимо отметить, что в [7] отрицается возможность существования каскадного эффекта.

Естественно, что из-за исключительно высоких давлений данный процесс представляет опасность в промышленных условиях. С этой точки зрения желательно иметь четкую градацию режимов разложения ацетилена с тем, чтобы определить область реализации сверхвысоких давлений.

В данной работе приводятся результаты экспериментального изучения нестационарных режимов пламени распада ацетилена, дается объяснение сверхвысоких давлений и условий существования нестационарных режимов.

Эксперименты проводились в трубопроводах диаметром $219 \times 8,5$; 120×10 и 75×13 мм, длиной 124,0; 36,0 и 32,6 м соответственно.

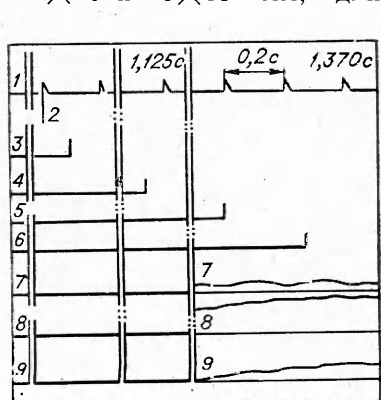


Рис. 1. Оциллограмма пульсирующего режима разложения ацетилена в трубопроводе.

1 — метка времени; 2 — момент инициирования взрыва; 3, 4, 5, 6 — сигналы фотодатчиков на расстоянии соответственно 0,1; 4; 8 и 10 м от электрозапала; 7, 8, 9 — сигналы датчиков давления на расстоянии соответственно 1, 3 и 5 м от электрозапала.

Давление регистрировалось индуктивными датчиками ДД-10 или ДДИ-21, рассчитанными на измерение давления до 100 ата и отличающимися базой (20 или 10 мм). Сигнал от датчика преобразовывался и усиливался индикатором ИД-2И, собственная частота которого равна 10 кГц, и регистрировался шлейфовым осциллографом Н-117 (Н-115). Распространение пламени фиксировалось фотоспротивлениями ФСК-1 (ФСА-1Г), подключенными непосредственно к гальванометрам осциллографа. Общая погрешность при измерении и расчете скорости распространения зоны реакции разложения составляет $\pm 5\%$.

Взрывной распад ацетилена инициировался в торце трубопровода перегоранием нихромовой проволоки диаметром 0,1 мм, длиной 10 мм от сети переменного тока напряжением 220 В.

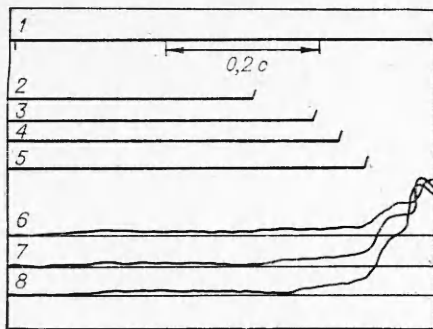


Рис. 2. Осциллограмма пульсирующего режима разложения ацетилена в трубопроводе $D_y=100$ мм, длиной 36 м при начальном давлении 2,0 ата.

1 — метка времени; 2, 3, 4, 5 — сигналы фотодатчиков на расстояниях соответственно 20, 22, 23 и 24 м от электрозапала; 6, 7, 8 — сигналы датчиков давления на расстояниях соответственно 22, 23 и 24 м от электрозапала.

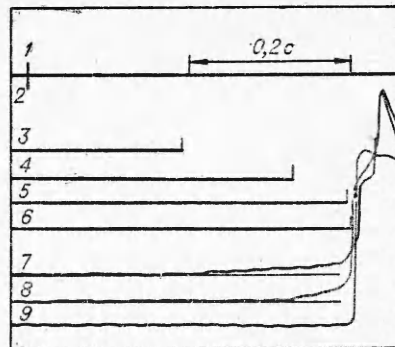


Рис. 3. Осциллограмма ускоряющегося нестационарного режима разложения ацетилена в трубопроводе $D_y=100$ мм, длиной 36 м при начальном давлении 3,0 ата.

1 — метка времени; 2 — момент инициирования взрыва; 3, 4, 5, 6 — сигналы фотодатчиков на расстояниях соответственно 1, 3, 9 и 19 м от электрозапала; 7, 8 — сигналы датчиков давления на расстояниях соответственно 1 и 3 м от электрозапала.

Перед началом опыта трубопровод опрессовывался с целью выявления и устранения неплотностей и продувался азотом, а затем ацетиленом до достижения 98—99% концентрации. Состав газа анализировался на аппарате ВТИ. Исследования проводились при начальном давлении от 1,4 до 3,0 ата.

Неускоряющийся нестационарный режим взрывного распада ацетилена наблюдается в трубопроводах диаметром 50 и 100 мм в интервале начальных давлений 3,4÷4,0 и 1,4÷2,0 ата соответственно. Осциллограмма ускоряющегося нестационарного режима распада ацетилена, протекающего в трубопроводе диаметром 50 мм при начальном давлении 3,0 ата, приведена на рис. 1. В данном опыте средняя величина скорости пламени на участках: от 0—0,1; 0,1—4,0; 4,0—8,0 и 8,0—10,0 м соответственно равна 16,0; 3,5; 18,1; и 80,0 м/с, т. е. скорость распространения фронта пламени носит пульсирующий характер. Датчики фиксируют плавный рост давления в системе до 13 ата.

С ростом начального давления или диаметра трубопровода характер протекания распада ацетилена значительно изменяется (рис. 2): датчики регистрируют ступенчатый рост давления. Это позволяет предположить, что пламя распространяется скачками. Последнюю треть длины трубопровода зона реакции проходит со скоростью 250—333 м/с. В момент прохождения пламени датчики, установленные на 22, 23 и 24 м, показывают давление соответственно 11, 13 и 23 ата.

Для описанных режимов характерно пульсирующее изменение скорости пламени. По [8] явление ускорения или замедления пламени связано соотношением между приращением давления перед фронтом пламени и приращением скорости пламени. В бесконечно длинном трубопроводе охлаждение продуктов реакции будет замедлять скорость перемещения пламени. В трубопроводах конечной длины на изменение скорости пламени и давления оказывают влияние еще два фактора: степень выгорания и отраженные волны. В коротких трубопроводах и при приближении пламени к торцу длинного трубопровода существенную роль может играть отражение волн сжатия от закрытого торца трубы. В ряде случаев в условиях, возникающих за фронтом отраженной волны, ацетилен может воспламениться, что приведет к возникновению давлений, превышающих начальное более чем в 11,56 раза (термодина-

мически возможный рост давления при взрывном распаде ацетилена в адиабатических условиях).

Распад ацетилена в ускоряющемся нестационарном режиме наблюдается в трубопроводах диаметром 50, 100 и 200 мм при давлениях, превышающих соответственно 4; 2 и 0,7 ата. При достаточной протяженности трубопровода этот процесс переходит в детонацию. Необходимо отметить, что приведенные значения давления для трубопроводов 50 и 100 мм близки к предельным, т. е. в одних опытах распад ацетилена проходит в неускоряющемся нестационарном, а в других — в ускоряющемся нестационарном режиме. Осциллограмма ускоряющегося нестационарного режима приведена на рис. 3. Вначале датчики фиксируют непрерывный рост давления в системе. После прохождения пламенем первого метра длины трубопровода датчики регистрируют местное повышение давления. При переходе в детонацию давление резко возрастает, причем датчики давления и фотоспротивления срабатывают одновременно.

Таким образом, ускоряющийся нестационарный режим распада ацетилена возможен в случае, если начальные параметры ацетилена и диаметр трубопровода не исключают детонацию. Он наблюдается в начальных участках трубопроводов большой протяженности и в трубах, длина которых меньше или соизмерима с преддетонационным расстоянием, т. е. ускоряющийся нестационарный режим является режимом формирования детонации.

Используя уравнения гидродинамики, описывающие нестационарный режим горения смеси горючее — окислитель [8], можно рассчитать параметры режима формирования детонации для взрывного распада ацетилена. При этом предполагается, что отношение удельных теплоемкостей постоянно для ацетилена и продуктов распада, трубопровод имеет постоянное сечение, инициирование реакции разложения осуществляется у закрытого торца трубопровода, а второй конец его бесконечно удален. Расчет проводился для начальных условий: температура — 289 К, давление — 1 ата, плотность — 1,071 кг/м³; скорость звука — 341 м/с [1], отношение удельных теплоемкостей — 1,227, эффективное энерговыделение — 3,96 · 10⁶ Дж/кг. Последняя величина расчетная и соответствует скорости детонации ацетилена 2 км/с (что следует из экспериментальных данных).

При давлении в ударной волне 1,04 ата ($\mu = 1,003$), распространяющейся по ацетилену со скоростью $D = 342,2$ м/с, скорость движения фронта пламени относительно газа перед этим фронтом (u_+) в n раз нормальной скорости пламени, т. е. наблюдается стационарный режим не полностью развитой дефлаграции. Однако движение газа за ударной волной в трубопроводах внутренним диаметром 50 мм и выше становится турбулентным, так как при скорости газа $\omega = 0,722$ м/с критерий Рейнольдса равен 3610 (вязкость ацетилена принята равной 104 мкПа·с [1]). Это приводит к увеличению скорости пламени и, следовательно, к росту мощности ударной волны. Вначале наблюдается докритический нестационарный режим распространения пламени, когда продукты реакции покоятся.

Из приведенных данных (см. таблицу) видно, что при величине видимой скорости пламени u от 0,8 до 229 м/с значения давления в ударной волне и в зоне реакции (p_3') практически одинаковы. Этим можно объяснить тот экспериментальный факт, что датчики давления в начальной стадии режима формирования детонации не регистрируют местного увеличения давления при прохождении мимо них зоны реакции со скоростью до 900 м/с. Когда видимая скорость пламени достигает величины 1017 м/с, продукты распада начинают двигаться в том же направлении, что и зона реакции, т. е. докритический режим рас-

Режим формирования детонации ацетилена (расчетные данные)

$\mu = P_2/P_1$	P_2 , ата	$n'_3 = P_3/P_1$	$\sigma = \rho_1/\rho_2$	$\sigma'_3 = \rho_1/\rho_3$	u_{\perp} , м/с	ω , м/с	D , м/с	u , м/с	u_3 , м/с	T_2/T_1
1,003	1,04	0,999	0,998	8,726	0,093	0,722	342,2	0,815	—	1,0005
1,050	1,06	1,049	0,961	8,321	1,774	13,59	348,2	15,37	—	1,0100
1,150	1,16	1,148	0,892	7,623	5,2	39,1	362,5	44,3	—	1,0250
1,200	1,22	1,196	0,862	7,322	6,8	51,1	370,2	57,96	—	1,0350
1,500	1,52	1,473	0,720	5,964	15,8	115,2	411,0	131,1	—	1,0800
2,000	2,03	1,895	0,573	4,653	28,2	201,2	470,6	229,5	—	1,1450
5,000	5,06	3,670	0,296	2,416	72,1	516,7	733,1	588,8	—	1,4800
10,000	10,13	5,210	0,200	1,703	109,8	826,2	1031,6	936,0	—	2,0000
11,490	11,64	5,512	0,187	1,613	117,8	898,9	1104,7	1016,7	—	2,1400
12,000	12,16	5,760	0,184	1,551	120,9	922,5	1129,2	1043,7	3,8	2,2100
15,000	15,19	7,260	0,167	1,267	136,2	1051,1	1260,8	1187,2	152,9	2,5000
25,000	25,32	12,400	0,141	0,817	187,2	1397,6	1625,7	1584,8	499,0	3,5200
30,000	30,39	15,060	0,135	0,705	212,7	1542,2	1780,8	1754,8	643,7	4,0500
35,000	35,45	17,750	0,130	0,624	236,4	1674,3	1922,6	1910,7	775,7	4,5500
39,200	39,71	20,060	0,127	0,572	256,4	1777,8	2034,4	2034,4	879,2	4,980

пространения пламени переходит в критический. Из таблицы видно, что переход происходит при $\mu > 11,49$, а критический режим наблюдается в интервале μ от 11,49 до 39,2. Момент равенства скорости ударной волны и видимой скорости пламени соответствует переходу ускоряющегося нестационарного режима в детонационный. При этом давление в ударной волне превышает начальное в 39,2 раза, а давление в зоне реакции, соответствующее давлению в плоскости Чепмена-Жуге, превышает начальное в 20 раз. Выполненный расчет приводит к значениям параметров детонации, согласующимся с экспериментально определенными [1] и рассчитанными другим методом [9]. Поэтому полученные данные были использованы для оценки параметров режима формирования детонации.

Расчет показывает, что наибольшее давление наблюдается в месте возникновения детонации, и в бесконечно длинных трубопроводах реализация сверхвысоких давлений невозможна при любых режимах разложения ацетилена. Поэтому следует рассмотреть влияние длины трубопровода на величину развивающегося в нем давления. В трубопроводах большей протяженности ускоряющийся нестационарный режим наблюдается на участке, длина которого равна преддетонационному расстоянию. Его параметры соответствуют значениям, приведенным в таблице. Так, в трубопроводе диаметром 200 мм при начальном давлении 2 ата преддетонационное расстояние составляет 17—20 м, т. е. в 7—6 раз меньше длины трубопровода. Рост давления неразложившегося ацетилена во всей системе в момент возникновения детонации не зафиксирован: при ударе детонационного фронта в торцевой фланец образующееся давление превышает начальное приблизительно в 50 раз. Если отношение длины трубопровода к преддетонационному расстоянию меньше 6, формирование детонации происходит при давлении, превышающем начальное. В трубопроводе диаметром 100 мм при начальном давлении 3 ата переход в детонацию происходит на длине 12 м, т. е. протяженность трубопровода превышает преддетонационное расстояние в 3 раза.

В момент начала сверхзвукового движения зоны реакции распада давление неразложившегося ацетилена составляет 7—10 ата, следовательно, газ в системе сжат в 2,3—3,3 раза. Поджатие ацетилена перед ускоряющимся фронтом горения тем выше, чем меньше отношение длины трубопровода к величине преддетонационного расстояния. При этом параметры режима формирования детонации превышают значения, соответствующие бесконечно большому трубопроводу. Если учесть, что максимальное поджатие ацетилена до воспламенения равно 20 ата,

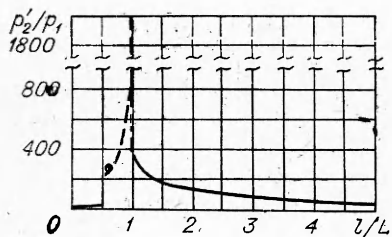


Рис. 4. Расчетная величина давления, образующегося при распаде ацетилена в режиме формирования детонации.

то при столкновении сформированного в этих условиях фронта детонации с торцом могут возникнуть давления, приблизительно в 2000 раз превышающие начальное. Дальнейшее сокращение длины трубопровода (меньше преддетонационного расстояния) будет сопровождаться уменьшением давления в отраженной волне. В предельном случае, когда протяженность трубопровода такова, что давление в падающей волне превышает начальное в 5 раз, давление в отраженной волне, как показывает расчет, превысит начальное в 20 раз, а температура ацетилена возрастет в 2 раза. Согласно [10], этого достаточно для самовоспламенения ацетилена и давление взрыва при этом может превысить исходное в 200 раз. При более низких давлениях в падающей волне реализация сверхвысоких давлений невозможна.

Проведенная работа позволяет устранить кажущиеся противоречия работ [5] и [7] и сформулировать условия реализации сверхвысоких давлений. Максимальные давления следует ожидать в тех случаях, когда длина трубопровода l соизмерима с преддетонационным расстоянием L . Качественная картина представлена на рис. 4. Теоретический расчет левой ветви кривой, показывающей величину давления при воспламенении ацетилена в отраженной волне, затруднен из-за невозможности установления связи между давлением в ударной волне и длиной трубопровода. Поэтому использованы экспериментальные данные, полученные при инициировании распада ацетилена в трубопроводах диаметром 200 мм различной протяженности. При $l/L < 0,5-0,6$ давление не превышало величины соответствующей адиабатической для пламени, распространяющегося с дозвуковой скоростью. При $l/L > 0,5-0,6$ в трубопроводе зафиксированы ударные волны различной мощности и их отражение на торце трубопровода. Значения давлений, превышающие начальное в 656—338 раз [6], соответствуют именно этой ветви. Правая ветвь описывает давление, образующееся при столкновении с торцом детонационной волны, распространяющейся по предварительно поджатому газу. Именно эти условия рассмотрены в [5] и интерпретированы автором как каскадный эффект. Максимальные давления наблюдаются при длине трубопровода, превышающей преддетонационное расстояние меньше, чем в 2 раза. Если протяженность трубопровода превышает преддетонационное расстояние в 2,5—5,0 раз, что имеет место в работе [6], то поджатие ацетилена к моменту формирования детонации невелико и незначительно зависит от длины трубопровода.

Таким образом, нестационарный режим быстрого горения [3,4] и каскадный эффект [5] являются разновидностью одного и того же ускоряющегося нестационарного режима — формирования детонации. Исходя из этого, представляется целесообразным классифицировать возможные режимы взрывного распада ацетилена следующим образом:

- дефлаграционный, характеризующийся постоянной дозвуковой скоростью распространения пламени и описываемый адиабатой Гюгонио;
- пульсирующий (неускоряющийся нестационарный) режим, параметры которого зависят от аппаратного оформления системы; реализуется при начальных условиях, исключающих возможность детонации, и в определенных условиях сопровождается давлениями, превышающими начальное в 11,56 раз;

- режим формирования детонации (ускоряющийся нестационарный режим), приводящий к возникновению сверхвысоких давлений при

отношении длины трубопровода к преддетонационному расстоянию в пределах 0,5—0,2;
детонационный режим распространения пламени.

*Рубежанский филиал Ворошиловградского
машиностроительного института*

*Поступила в редакцию
17/III 1975*

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Миллер. Ацетилен, его свойства, получение и применение. Т. 1. Л., «Химия», 1969.
2. Б. А. Иванов. Физика взрыва ацетилена. М., «Химия», 1969.
3. С. М. Когарко, А. А. Бородулин и др. Хим. пром., 1962, 7.
4. С. М. Когарко. ЖТФ, 1958, 28, 2041.
5. Н. В. Sargent. Chem. Eng. 1957, 64, 2.
6. А. Г. Лямин. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1968.
7. Б. А. Иванов, С. М. Когарко. ПМТФ, 1963, 3, 59.
8. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
9. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд. ФГВ, 1970, 6, 2.
10. S. M. Miller. Intern. Chem. Eng. Proc. Ind., 1951, 32, 476.

УДК 659.3'24'6.018.295+662.215.25

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ВНУТРЕННЕОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

М. П. Бондарь, А. А. Дерibas, В. А. Симонов

Метод внутреннего окисления позволяет получить структуры, обеспечивающие высокие жаропрочные свойства материалов, в тонких фольгах или порошках. Как правило, массивные образцы получают различными методами прессования и последующего спекания, в частности методом горячей экструзии [1,2]. Указанные способы требуют получения порошка или стружки из сплавов с сильным окислительнообразующим элементом, их внутреннего окисления и последующих процессов прессования и спекания при высокой температуре. В настоящей работе рассматривается получение массивных образцов из медных сплавов способом сварки взрывом, не требующим измельчения сплавов и многократных прессований и спеканий для обеспечения теоретической плотности материала.

В качестве исходных материалов в работе использовались сплавы $\text{Cu} - 0,2\% \text{Be}$ и $\text{Cu} - 0,4\% \text{Al} - 0,05\% \text{Ti}$, выплавленные в вакууме ($\sim 10^{-4}$ мм рт. ст.). Слитки сплавов проковывались до толщины 3 мм, а затем прокатывались до 1 и 0,5 мм с промежуточными отжигами в вакууме при 800°C . Из пластин вырезались образцы площадью 120×40 мм². Для получения разного размера зерен образцы отжигались при 1000 и при 300°C . Заметная разница в размере зерен после внутреннего окисления сохранялась только в сплавах с Be. Образцы этого сплава после отжига при 1000°C имели зерна размером 500—1000 мкм, их в дальнейшем называем крупнозернистыми, после отжига при 300°C размер зерен у поверхности пластин был 50—100 мкм (мелкозернистые). Внутреннее окисление образцов проводилось в закрытом контейнере в смеси порошков Cu_2O и Al_2O_3 при 950°C в течение 8 и 3 ч в соответствии с толщиной окисляемых пластин. Образцы, после внут-