

**ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ,
АРМИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТАМИ
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

УДК 621.454.3+629.7.06.3

В. А. Архипов, А. К. Абушаев, В. Ф. Трофимов

НИИ прикладной математики и механики, 634050 Томск

Представлены результаты экспериментального исследования нестационарных процессов при горении в полужамкнутом объеме образцов модельного конденсированного вещества, армированных элементами с эффектом памяти формы (никелид титана). Показано, что тепловое и механическое воздействия элементов на процесс горения позволяют существенно расширить диапазон регулирования скорости горения конденсированных систем по сравнению с известным способом (использование проволок или пластин с высоким коэффициентом теплопроводности).

Один из перспективных способов регулирования скорости горения конденсированных веществ — использование теплопроводящих элементов. Последние выполняются, как правило, из металлов с высоким коэффициентом теплопроводности (медные, магниевые или серебряные проволоки, пластины, трубки, хаотически либо упорядоченно армирующие образец). Известные теоретические зависимости, подтвержденные экспериментальными данными, удовлетворительно описывают изменение скорости горения составов, армированных теплопроводящими элементами с различной их ориентацией относительно фронта волны горения, и позволяют прогнозировать закон газоприхода [1–6]. Для гомогенных систем тепловое воздействие теплопроводящих элементов на волну горения описывается в рамках теории Я. Б. Зельдовича. В первом приближении увеличение скорости горения пропорционально квадратному корню из теплопроводности и доли объема, занятого элементами в образце. В работах [3, 4] в рамках приближенной модели распространения пламени вдоль бесконечной металлической проволоки получено выражение для эффективности ее воздействия на процесс горения:

$$z = \frac{u}{u_0} = \frac{A\sqrt{\lambda_m}}{(u_0 d)^{1-m/2}} \left[\left(\bar{c}_m c_m + \frac{4\lambda_k}{u_0 d} \right) \left(\rho_m c_m \Theta + \frac{4\lambda_k}{u_0 d} \right) \right]^{-1/2} \quad (1)$$

Здесь u_0, u — скорости горения исходного и армированного образцов; $d, \lambda_m, \rho_m, c_m$ — диаметр, теплопроводность, плотность и теплоемкость проволоки; λ_k — теплопроводность исходного конденсированного вещества; k, m — константы в соотношении для теплоотдачи от газообразных продуктов сгорания к проволоке $Nu = k Re^m$; $\Theta = (T_{пл} - T_0)/(T_s - T_0)$, где $T_{пл}$ — температура плавления проволоки, T_0 — начальная температура, T_s — температура поверхности горящего образца;

$$A = \frac{2}{T_s - T_0} \left[k \lambda_g \left(\frac{\rho_k}{\eta_g} \right)^m (T_{пл} - T_s) \left(T_g - \frac{T_{пл} + T_s}{2} \right) \right]^{1/2},$$

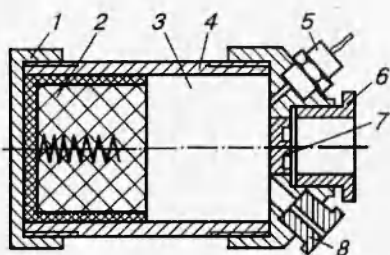


Рис. 1

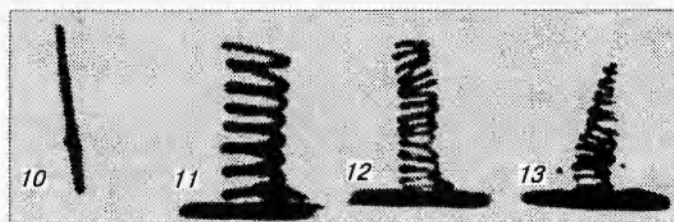


Рис. 2

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — головная крышка; 2 — исследуемый образец; 3 — камера сгорания; 4 — корпус; 5 — датчик давления; 6 — блок сброса давления; 7 — прорывная мембрана; 8 — сопло

Рис. 2. Рентгенограммы образцов, армированных теплопроводящими элементами стержневой и спиралеобразной форм

λ_g , η_g , T_g — теплопроводность, динамическая вязкость, температура продуктов сгорания; индекс g относится к газообразным продуктам сгорания.

Согласно (1) и опытным данным [4], при использовании медных проволок величина $z = 2,5 \div 3,5$.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования нестационарных процессов при горении образцов модельного состава, армированных теплопроводящими элементами из никелида титана — сплава с эффектом памяти формы.

В настоящее время известен ряд сплавов, в которых происходит обратимый мартенситный переход при изменении температуры, приводящий к эффекту запоминания формы [7–9]. Одно из свойств таких сплавов — восстановление первоначально заданной формы при нагревании до определенной температуры T_* . Так, пружина из данного сплава при нагревании в волне горения распрямляется, принимая первоначальную форму.

Предельное разрывное напряжение для типичных смесевых составов не превышает значений 0,5–1,0 МПа [10]. Усилие, развиваемое при восстановлении формы в сплаве ТН-1, составляет ~ 100 –400 МПа [7]. Таким образом, теплопроводящий элемент способен деформировать и разрушать близлежащие слои конденсированного вещества. Это может привести к тому, что при горении армированных образцов увеличение скорости горения будет обусловлено не только тепловым, но и механическим воздействием теплопроводящего элемента на близлежащие слои образца.

Экспериментальное исследование процессов нестационарного горения армированных образцов проводилось с использованием как безметалльного, так и металлизированного (с содержанием 10% порошка алюминия) модельных составов, изготовленных на основе перхлората аммония и бутилкаучукового горючего-связующего. В экспериментах использовались образцы торцевого горения диаметром 40 и длиной 40–50 мм, забронированные по боковой поверхности негорючим покрытием. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. К головной крышке 1 корпуса 4 прикреплен исследуемый образец 2, открытый торец которого находится в камере сгорания 3. Продукты сгорания удаляются через сопло 8. Камера сгорания оснащена блоком сброса давления 6 (прорывная мембрана 7), датчиком давления 5 типа ЛХ-412 и воспламенителем.

Таблица 1
Теплофизические характеристики материалов теплопроводящих элементов
при $T = 293$ К

Материал	$T_{пл},$ К	$\rho_m,$ кг·м ⁻³	$c_m,$ Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	$\lambda_m,$ Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	$\alpha_m \cdot 10^5,$ м ² ·с ⁻¹
Алюминий	931	2710	902	236	9,65
Магний	924	1730	1020	156	8,84
Медь	1356	8930	386	398	11,5
Серебро	1235	10500	234	427	17,4
Сплав ТН-1	1554	6443	550	18	0,51
Графит	—	2240	990	25	1,13

Примечание. α_m — коэффициент температуропроводности.

Таблица 2
Геометрические характеристики теплопроводящих элементов (сплав ТН-1)

Элемент	Внешний размер, мм	d (толщина), мм	Тип деформации (исходная — конечная)
Пластина	12,0	0,7	Винт (левый) — винт (правый)
Спираль 1	15,5	2,05	Спираль — стержень
Спираль 2	8,0	1,0	Спираль ($d = 8,0$ мм) — спираль ($d = 12,0$ мм)
Спираль 3	6,5	0,95	Спираль — стержень

В образцы запрессовывались элементы цилиндрической, пластинчатой и спиралеобразной форм, изготовленные из никелида титана (сплав ТН-1), а в ряде опытов — стержни из меди и графита. Основные теплофизические характеристики сплава ТН-1, а также традиционно используемых армирующих материалов представлены в табл. 1.

Геометрические характеристики используемых в экспериментах элементов представлены в табл. 2. Линейные размеры свода образца над теплопроводящими элементами, а также ориентация элементов и качество их запрессовки контролировались с помощью рентгенограмм (рис. 2) и использовались при обработке результатов экспериментов.

Программа экспериментов включала следующие этапы:

- исследование погашенных на воздухе образцов;
- отработка торцевых режимов горения для безметалльного и металлизированного составов;
- исследование нестационарных процессов горения, обусловленных эффектом теплового воздействия стержневых элементов из никелида титана, а также медных и графитовых армирующих стержней;
- исследование нестационарных процессов горения, обусловленных эффектом теплового и механического воздействий спиральных и пластинчатых армирующих элементов из никелида титана.

Экспериментальные данные о механизме воздействия элементов с эффектом памяти формы получены при гашении образцов на воздухе и в камере сгорания методом сброса

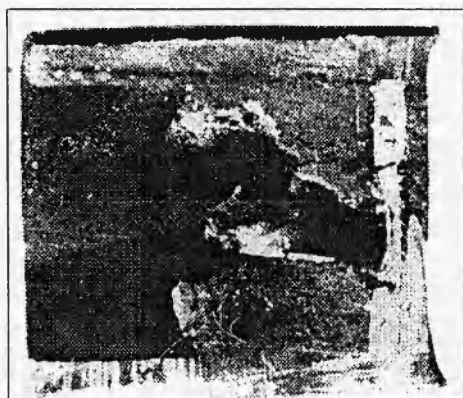


Рис. 3

Рис. 3. Осевой разрез погашенного образца

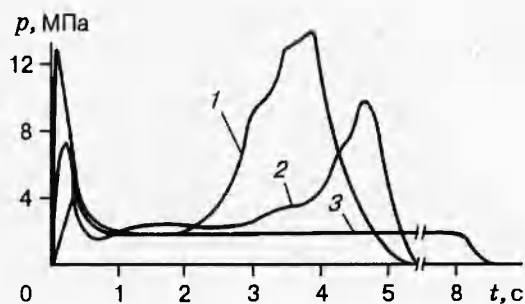


Рис. 4

Рис. 4. Типичный вид осциллограмм $p(t)$ для стационарного (3) и нестационарных (1, 2) режимов горения армированных образцов (1 — металлизированный состав; 2 — безметалльный состав)

давления. Нагревание элемента в виде пластины при горении образца на воздухе приводит к образованию в нем трещин, воспламенение которых проходит в конвективном режиме. На рис. 3 показан осевой разрез образца, погашенного на воздухе. Коническое отверстие вдоль пластины образовалось при ее повороте, деформации, разрушении и выгорании топлива. В камере сгорания увеличение поверхности горения происходит более интенсивно. На погашенном образце зарегистрировано более чем двукратное увеличение поверхности горения.

Анализ результатов первой серии экспериментов (на воздухе) показал, что при воздействии теплового потока запрессованные элементы из никелида титана восстанавливают первоначально заданную форму, вызывая деформацию и локальное разрушение топлива. Образующиеся при этом трещины воспламеняются, чем и объясняется увеличение поверхности горения и газопритока.

Обработка торцевого режима горения неармированных образцов как металлизированного, так и безметалльного состава проводилась в целях уточнения диаметра критического сечения сопла, обеспечивающего устойчивое горение в камере, а также в целях проверки качества бронирующего покрытия. На рис. 4 приведена характерная осциллограмма торцевого режима горения безметалльного состава при давлении ~ 2 МПа. При отсутствии в образце армирующих элементов реализуется квазистационарный режим горения. Следовательно, отклонения от стационарности в последующих сериях экспериментов обусловлены наличием в образце армирующего элемента.

При армировании образцов теплопроводящими элементами обеспечивались два режима горения: торцевой (квазистационарный) и нестационарный, который реализовывался после достижения фронтом волны горения армирующего элемента, подвергающегося при этом тепловому воздействию высокотемпературных продуктов сгорания (см. рис. 4, кривая 2).

Скорость прогрета элемента до температуры начала деформации (~ 400 К), оцененная

решением нестационарного уравнения теплопроводности, превышает линейную скорость горения. Таким образом, элемент «успевает» проявить свои свойства и разрушает прилегающие слои конденсированных веществ.

Серия экспериментов со стержневыми элементами проводилась в целях проверки степени влияния теплового механизма на процесс нестационарного горения армированных образцов. В экспериментах с графитовыми стержнями образец сгорает полностью в стационарном режиме, а в опытах с медным стержнем после гашения образца сбросом давления вокруг стержня — в виде конуса. Это свидетельствует об увеличении скорости сгорания за счет теплового механизма. Эффективность воздействия теплопроводящего элемента удовлетворительно описывается формулой (1).

Характерная осциллограмма процесса горения в полузамкнутом объеме металлизированного образца, армированного спиралью 1 (см. табл. 2), выпрямляющейся в стержень при нагревании, приведена на рис. 4 кривой 1. Развитие нестационарного процесса связано со вскрытием армирующего элемента. Наиболее эффективное воздействие никелида титана на процесс горения образца зарегистрировано при давлении в камере $\sim 3,5$ МПа. Ступенчатый характер нарастания давления обусловлен разрушением топливной массы за счет нагревания и распрямления витков спирали. Максимальный уровень давления в камере ~ 10 МПа при догорании образца. Время сгорания заряда по сравнению с торцевым режимом горения сокращается в 2–4 раза. Аналогичные результаты получены при исследовании нестационарных процессов горения безметалльных составов. Для высокотемпературного металлизированного состава нестационарный процесс развивается в более интенсивном режиме, чем для безметалльного конденсированного вещества. Уровень максимального давления в камере сгорания при догорании металлизированных образцов примерно в 2 раза выше соответствующего для безметалльного состава.

Отмечено также, что динамические и амплитудные характеристики нестационарного процесса повышаются при уменьшении характерного размера (для стержней — диаметра d) армирующих элементов из никелида титана. Эти данные качественно согласуются с оценками, проведенными с использованием теории [3]. В проведенных экспериментах наибольший эффект получен для спирали, распрямляющейся при нагревании в стержень, а также для пластины, разворачивающейся на 180° . В табл. 3 представлены значения $z = u_e/u_0$, полученные в опытах, а также рассчитанные с использованием формулы (1). При определении эффективной скорости горения u_e армированного образца решалась обратная задача внутренней баллистики с использованием зависимостей $p(t)$.

Сравнение характеристик сгорания образцов, армированных медными элементами и элементами с эффектом памяти формы, показывает, что суммарное тепловое и механическое воздействие спирального элемента из никелида титана обеспечивает наиболее эффективное изменение поверхности горения и газоприхода с образца в камере сгорания. Таким образом, несмотря на низкие значения коэффициента теплопроводности никелида титана, суммарное тепловое и механическое воздействие армирующих элементов с эффектом памяти формы может существенно увеличить эффективную скорость горения топлива. Закон газоприхода при этом определяется формой теплопроводящего элемента и геометрией его запрессовки. Рассмотренный способ позволяет существенно расширить диапазон регулирования скорости горения твердых топлив.

Таблица 3

Эффективность воздействия теплопроводящих элементов
на процесс горения топлива
(безметалльный состав; $u_0 = 5$ мм/с при $p = 2,0$ МПа)

Геометрия	Материал	$z = u_e/u_0$	
		эксперимент	расчет по (1)
Стержень ($d = 0,5$ мм)	Медь	3,2	2,94
Стержень ($d = 1,0$ мм)	Медь	2,2	1,80
Пластина	Сплав ТН-1	5,1	$z < 1,0$
Спираль 1	Сплав ТН-1	4,2	$z < 1,0$
Спираль 2	Сплав ТН-1	3,8	$z < 1,0$
Спираль 3	Сплав ТН-1	4,7	$z < 1,0$

Примечание. Величина u_e определялась по формуле $u_e = u(S_e/S_k)$, где S_e — эффективная поверхность горения, S_k — площадь поверхности горения исходного (неармированного) образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Присняков В. Ф.** Динамика ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение, 1984.
2. **Рыбанин С. С., Стесик Л. Н.** Теория горения конденсированного топлива с плоским теплопроводящим элементом // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 5. С. 634–643.
3. **Бахман Н. Н., Лобанов И. Н.** Влияние теплопроводящих элементов на скорость горения // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 3. С. 501–506.
4. **Бахман Н. Н., Лобанов И. Н.** Влияние диаметра теплопроводящих элементов на их эффективность при горении конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 1. С. 46–50.
5. **Уинч П. К., Эрвайн Р. Д.** Активное управление скоростью выгорания ТРТ посредством конуса ускоренного горения // Аэрокосмическая техника. 1988. № 12. С. 178–186.
6. **King M.** Analytical modeling of effects of wires on solid motor ballistics // AIAA Paper. 1989. № 2784.
7. **Корнилов Н. И., Белоусов О. К., Качур Е. В.** Никелид титана и другие сплавы с эффектом «памяти». М.: Наука, 1977.
8. **Гавренко О. А., Краснокутский А. В., Мерисов Б. А., Хаджай Г. Я.** Теплопроводность некоторых сплавов с «памятью формы» в области фазового перехода // Теплофизика высоких температур. 1989. № 2. С. 399–400.
9. **Анохин С. В., Лотков А. И.** Изменение электронной и кристаллической структур в сплавах Ti (Ni, Fe) перед мартенситным превращением // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307, № 5. С. 1112–1114.
10. **Москвитин В. В.** Соппротивление вязкоупругих материалов. М.: Наука, 1972.

Поступила в редакцию 21/III 1995 г.