

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕГРУЗОК НА ГОРЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЕВЫХ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ СОСТАВОВ

Ю. М. Максимов, Э. И. Максимов, В. Н. Виллюнов
(Москва)

В настоящее время большой интерес представляет изучение горения в поле ускорений металлизированных смесевых составов на основе перхлората аммония (ПХА). Имеющиеся в литературе работы по этому вопросу относятся главным образом к горению алюминизированных составов. В результате исследований [1—8] были установлены следующие качественные закономерности:

1. Скорость горения алюминизированных составов увеличивается по мере роста перегрузок, направленных перпендикулярно к поверхности горения.
2. Топлива с большой скоростью горения в отсутствие перегрузок обладают меньшей чувствительностью к перегрузкам [6, 7].
3. Уменьшение размера частиц алюминия (в диапазоне 8—50 мк) приводит к уменьшению влияния перегрузки на скорость горения топлив [6, 7].
4. Для составов с бимодальным распределением частиц ПХА увеличение весового содержания мелкодисперсного окислителя ведет к снижению чувствительности составов к перегрузкам [5, 7].
5. После сгорания алюминизированных составов при перегрузках остается конденсированный остаток [2—8].

Сопоставить имеющиеся результаты трудно, так как использовались составы, содержащие разные горючие. В работах применялся окислитель только с бимодальным распределением частиц. Исследованный диапазон изменения размеров частиц алюминия в составах очень узкий, что затрудняет оценку влияния размеров частиц Al на скорость горения при перегрузках. Вопрос о роли вида горючего и его содержания на горение составов при перегрузках не исследован. Практически не исследовались составы, в которых вместо алюминия применялся бы другой металл. Вопрос о влиянии давления при горении составов в поле массовых сил также не выяснен.

В ряде работ содержатся противоречивые данные. Так, увеличение содержания алюминия по одним данным приводило к уменьшению относительной скорости горения u/u_0 (u — скорость горения при перегрузках, u_0 — скорость горения при отсутствии перегрузок) [5], по другим — к увеличению [6].

В данной работе ставилась задача систематического изучения горения модельных металлизированных составов в поле массовых сил. Для этого в широком интервале изменялась доля одного из компонентов топлива при постоянстве других. Исследовалась зависимость скорости горения модельного состава от перегрузки как функция размеров частиц ПХА и Al, процентного содержания горючего, статической скорости горения u_0 , давления и длины образца. Получена информация о количестве остатка при различных перегрузках. Кроме того, изучалось влияние перегрузки на скорость горения составов, в которых в качестве добавки использовались титан, вольфрам и окись алюминия.

Методика экспериментов

Опыты проводились во вращающейся бомбе постоянного давления [9, 10] при перегрузках до 1000 g и давлениях до 50 ат. Скорость горения замерялась по фоторегистрации процесса на движущуюся пленку

фоторегистра. Относительно большой объем бомбы (5 л) и малая поверхность горения образцов ($d=9$ мм) оставляли давление во время опыта практически постоянным.

В качестве основного состава использовалась смесь ПХА+парафин (П)+Al. В предварительно расплавленный парафин засыпалась тщательно перемешанная смесь ПХА и Al. Затем состав тщательно перемешивался и после остывания легко растирался пробкой. Образцы прессовались до плотности $\rho_b=1,75$ г/см³ и длины $L=25$ мм, бронировались эпоксидной смолой, затем плотно вставлялись в кварцевые трубки.

Кроме парафина, в качестве горючего использовались также полиэтилен (ПЭ), нафталин (НФ), битум (Б) и углерод (С). В качестве добавки в составы вводились частицы Al размером¹ 0,3, 20 и 200÷250 мк. Кроме того, использовались порошки Al₂O₃ со среднемассовым размером 170 мк, вольфрам с размером частиц 1—5 мк и 40—100 мк, титан с размером частиц 75 мк. Порошки металла вводились при постоянном соотношении между горючим и окислителем (т. е. сверх 100%). Для изменения скорости горения составов u_0 применялись смесь окиси меди и окиси хрома (2%) в качестве катализатора или фтористый литий (2%) в качестве ингибитора. ПХА использовался двух фракций (менее 50 мк или 315÷500 мк). Опыты проводились при перегрузках, направленных на поверхность горения.

Результаты экспериментов

Как показали опыты, перегрузки не влияли на скорость горения составов, которые не содержали металла. При горении металлизированных составов степень влияния перегрузки на скорость горения зависит от следующих факторов.

На рис. 1—4 представлены зависимости $u/u_0(a/g)$, где a — величина ускорения, создаваемого вращающейся бомбой, g — ускорение свободного падения, d_{Al} — размер частиц Al, $d_{ок}$ — размер частиц ПХА. Как видно из графиков, u/u_0 растет до $a=400\div 500$ g (для $d_{Al}=20\div 250$ мк), после чего остается практически постоянным. С ростом процентного содержания Al при данной перегрузке (рис. 5) значение u/u_0 стремится к постоянной величине. При содержании алюминия более 25% значения u/u_0 для составов с частицами 20 и 200÷250 мк практически одинаковы.

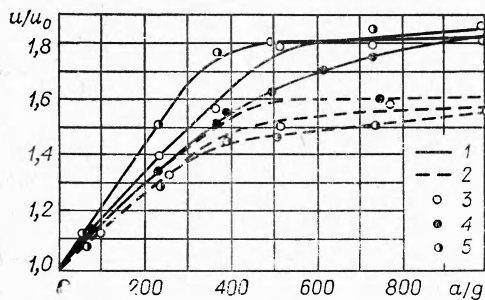


Рис. 1. Состав ПХА+П+Al, $d_{Al}=20$ мк, $d_{ок}=315-500$ мк.
1 — 13% Al; 2 — 5% Al; 3 — $p=20$ ат; 4 — $p=50$ ат, 5 — $p=8$ ат.

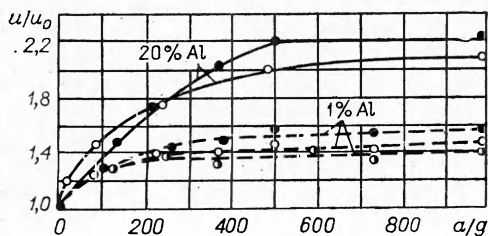


Рис. 2. Состав ПХА+П+Al, $d_{Al}=200-250$ мк, $d_{ок}=315-500$ мк. Обозначения см. на рис. 1.

Составы с более крупным размером частиц Al в большей степени подвержены воздействию перегрузки (см. рис. 1—4), что согласуется с результатами работ [6, 7]. Максимальное увеличение скорости горения получено на составе с $d_{Al}=200\div 250$ мк. Менее чувствительными к перегрузкам оказались составы с $d_{Al}=$

¹ Алюминий с диаметром частиц 0,3 мк получен в лаборатории М. Я. Гена (ИХФ АН СССР), алюминий размером 20 мк (92% по весу) получен В. И. Шевцовым (ОИХФ АН СССР). Крупный алюминий диаметром 200÷250 мк брался марки А-995.

$=0,3$ мк (см. рис. 3). Здесь следует заметить, что скорости горения в статических условиях для составов с $d_{Al}=20$ мк и $d_{Al}=200\div250$ мк были равны, тогда как введение в состав 20% мелкодисперсного Al с $d_{Al}=0,3$ мк увеличивало u_0 почти в 2 раза. Изменение давления в диапазоне 8—50 ат для состава ПХА+П+Al не приводит к заметному влиянию на зависимость $\frac{u}{u_0}(a)$ (рис. 1, 2, 4). Показатель n в законе скорости горения (в статических условиях) для этого состава близок к 0,5.

Относительная скорость горения составов с мелким ПХА при данной перегрузке всегда ниже, чем для составов с крупным порошком (см. рис. 1—4). Уменьшение размеров частиц ПХА с 500 до 50 мк в составе с мелкодисперсным Al ($d_{Al}=0,3$ мк) привело к исчезновению зависимости скорости горения от перегрузки.

Увеличение статической скорости горения (путем добавления в состав катализатора) приводило к тому, что величина u_0 становилась менее чувствительна к перегрузкам. Введение же в состав ингибитора увеличивало зависимость $u(a)$. На рис. 6 приведены результаты опытов по горению состава ПХА+П+13% Al с разными u_0 . Для сравнения на графике нанесена зависимость $u(a)$ для того же состава, но с $d_{ок}=315\div500$ мк. Как видно из графика, с ростом перегрузки скорость горения стремится к своему предельному значению $u_{пр} \approx 12$ мм/с независимо от значения u_0 ($u_{пр}$ — значение скорости горения, которое с ростом перегрузки практически не меняется). На рис. 7 эти же результаты опытов представлены в координатах $\frac{u}{u_0} - u_0$ для различных a/g .

Была определена зависимость относительной скорости горения от величины перегрузки для состава ПХА+П+10% Al с длиной образцов 25 и 50 мм. С увеличением длины образца скорость горения возросла не более чем на 10%. Следует отметить, что скорость горения не менялась на образцах длиной 25 мм и незначительно увеличивалась к концу горения образца длиной 50 мм.

Содержание горючего также влияет на чувствительность состава к перегрузкам. Значения u_0 и $u_{пр}/u_0$ ($a=1000$ г) от α следующие:

α	u_0 , мм/с	$u_{пр}/u_0$
1,0	6,0	1,9
2,0	3,7	2,0
0,5	4,5	2,3

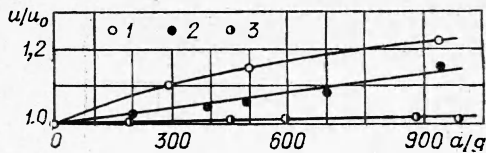


Рис. 3. Состав ПХА+П+Al, $d_{Al}=0,3$ мк, $p=20$ ат.
1—20% Al, $d_{ок}=315-500$ мк; 2—5% Al, $d_{ок}=315-500$ мк; 3—5% Al, $d_{ок}<50$ мк.

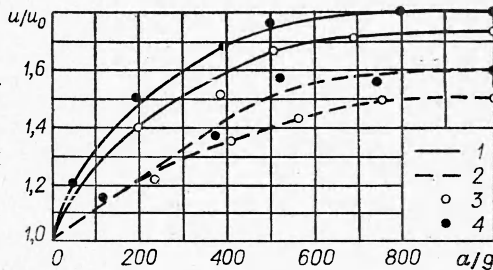


Рис. 4. Состав ПХА+П+Al, $d_{ок} \leq 50$ мк.
1—20% Al; 2—13% Al; 3— $p=20$ ат; 4— $p=50$ ат.

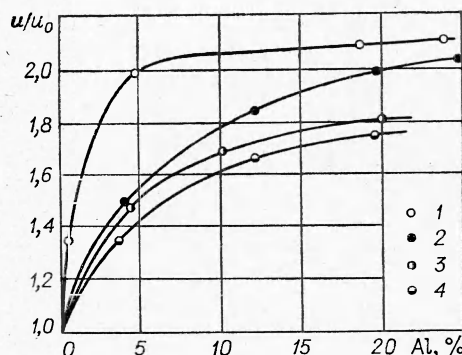


Рис. 5. Зависимость u/u_0 от процентного содержания Al, $a=1000$ г, $p=20$ ат.
1— $d_{Al}=200-250$ мк, $d_{ок}=315-500$ мк; 2— $d_{Al}=20$ мк, $d_{ок}=315-500$ мк; 3— $d_{Al}=200-250$ мк, $d_{ок}<50$ мк; 4— $d_{Al}=20$ мк, $d_{ок}<50$ мк.

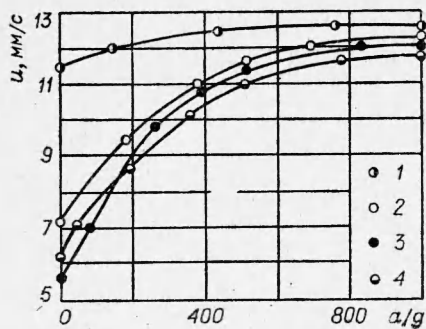


Рис. 6. Состав ПХА+П+13% Al, $p=20$ ат, $d_{Al}=20$ мк.
 1 — $d_{OK} \leq 50$ мк + катализатор; 2 — $d_{OK} \leq 50$ мк;
 3 — $d_{OK} \leq 50$ мк + ингибитор; 4 — $d_{OK} = 315 \div 500$ мк.

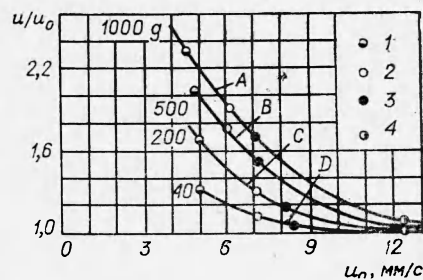


Рис. 7. Состав ПХА+П+13% Al, $p=20$ ат, $d_{Al}=20$ мк.
 1 — $d_{OK} \leq 50$ мк + ингибитор; 2 — $d_{OK} \leq 50$ мк;
 3 — $d_{OK} = 315-500$ мк; 4 — $d_{OK} \leq 50$ мк + катализатор.

Максимальное увеличение скорости горения дает состав с избытком горючего ($\alpha=0,5$). Однако $u_{пр}$ выше для состава с $\alpha=1$.

Для выяснения влияния вида горючего на горение алюминизированных составов использовались следующие вещества, предположительно располагающиеся в ряд по мере уменьшения легучести: нафталин, парафин, битум, полиэтилен, углерод. Размер частиц и процентное содержание ПХА и Al в составах не изменялись. Экспериментальные данные приведены на рис. 8. Наименьшее увеличение скорости горения при перегрузке дал состав с негазифицирующимся горючим — углеродом ($u/u_0=1,4$).

На рис. 9 приведены результаты опытов, где в качестве добавки в составы вводились 5 и 10% Al_2O_3 с размером частиц 170 мк. Для сравнения на этом же графике нанесены данные опытов по горению состава с добавкой 5% Al с $d_{Al}=200$ мк (5% Al в случае полного сгорания давали 10% Al_2O_3 от общего веса образца). Состав с Al гораздо чувствительнее к перегрузкам, чем с окисью алюминия.

В опытах использовался состав на основе ПХА+ПЭ с добавкой титана и вольфрама. Как видно из рис. 10, наибольший эффект увеличения скорости горения при перегрузках дает состав с содержанием 13% W. Асимптотическая зависимость $\frac{u}{u_0}$ (a) в этом случае не наблюдается. Значения относительных скоростей горения при $a=1000$ g для составов с Al и Ti соответственно равны 1,9 и 1,7.

После сгорания в поле перегрузок составов с Al и Ti на дне кварцевых стаканчиков оставалось значительное количество конденсированного остатка. Проведенный химический анализ показал, что остатки состоят из алюминия и окиси алюминия. Во всех опытах количество

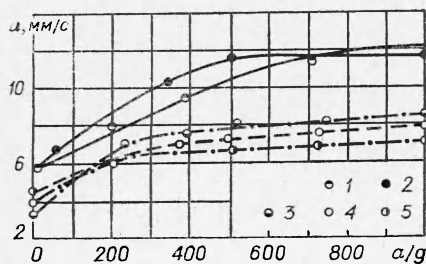


Рис. 8. ПХА+св+13% Al, $d_{OK}=315-500$ мк, $d_{Al}=20$ мк, $p=20$ ат.
 1 — битум; 2 — парафин; 3 — нафталин; 4 — полиэтилен; 5 — углерод.

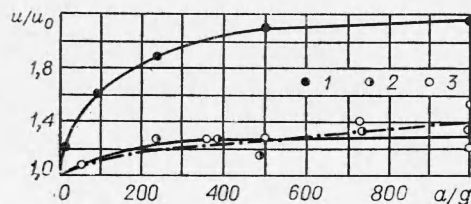


Рис. 9. ПХА+П+ Al_2O_3 и ПХА+П+Al, $p=8$ ат, $d_{OK}=315-500$ мк.
 1 — 5% Al; 2 — 5% Al_2O_3 ; 3 — 10% Al_2O_3 .

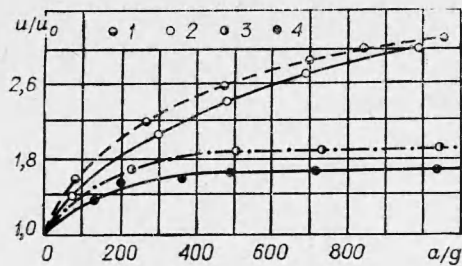


Рис. 10. Влияние добавок W, Ti и Al на $\frac{u}{u_0}$ (a), $d_{ок}=315-500$ мк, $p=20$ ат.

1 - $d_W=40-100$ мк; 2 - $d_W=1-5$ мк, 13% W; 3 - 10% Al, $d_{Al}=100$ мк; 4 - 15,8% Ti, $d=75$ мк.

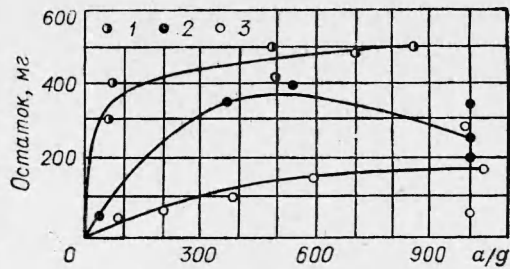


Рис. 11. Сравнение масс остатков состава ПХА+П+20% Al.

1 - $d_{Al}=0,3$ мк, $d_{ок}=315-500$ мк; 2 - $d_{Al}=0,3$ мк, $d_{ок}=50$ мк; 3 - $d_{Al}=200-250$ мк, $d_{ок}=315-500$ мк.

остатка по мере роста перегрузок возрастало (рис. 11). Если при малых перегрузках остаток имел вид сферической частицы с $d=1$ мм, то при больших перегрузках он принимал форму таблетки и полностью заполнял дно стаканчика. Остаток в виде сплавленных друг с другом частиц Al_2O_3 оставался и при горении составов с окисью алюминия. Исключение составлял состав с добавкой вольфрама. После сжигания этого состава остатка не наблюдалось, что также было замечено в работе [11]. Из приведенных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы: наибольшее количество остатка остается у составов с частицами Al малых размеров, вес его увеличивается с размерами частиц ПХА и с длиной образца.

С целью определения полноты сгорания алюминия были проведены следующие опыты. Образец длиной 50 мм склеивался из двух таблеток по 25 мм. Верхняя часть большого образца содержала алюминий, нижняя часть была без металла. Определялась скорость горения таблетки, не содержащей металл. В поле массовых сил Al (после сгорания верхней таблетки) прижимался к поверхности горения нижней таблетки и горел на ней. В качестве верхней таблетки использовался состав ПХА+ПЭ+30% Al. Вводился алюминий с размерами частиц: 3 мк, 200 мк, 0,3 мк. Соответственно получены увеличения скорости горения нижней таблетки в 2; 1,8 и в 1,2 раза.

Обсуждение результатов

Наличие остатка после сгорания алюминизированных составов свидетельствует о том, что над поверхностью горения образуется «зона», определяющая процесс горения и состоящая из Al, Al_2O_3 и газообразных продуктов, концентрация и степень смешения которых зависит от исходных компонентов смеси. Закономерности горения в этой «зоне» будут определяться ее физическими свойствами, распределением температуры в ней, скоростью газа и его количеством (т. е. будут меняться в зависимости от скорости горения, изменения стехиометрии, вида горючего и т. д.). Все эти факторы могут действовать на «зону» в совокупности. Задача заключалась в том, чтобы выделить действие каждого из них в отдельности.

Одним из таких факторов можно считать скорость протекающего через «зону» газа. Изменение скорости течения газа достигалось введением в состав ингибитора или катализатора. Опыты показали, что с ростом u_0 чувствительность к перегрузкам уменьшается (см. рис. 7). Можно предположить, что чувствительность составов к перегрузкам при изменении других параметров топлива также связана через измене-

ние u_0 . Это предположение можно проверить, если нанести данные остальных опытов на график рис. 7. Если экспериментальные точки не попадают на кривые, то помимо влияния u_0 есть еще какие-то дополнительные факторы. Так, увеличение размеров частиц ПХА (рис. 7, А, В, С) приводит к тому, что экспериментальные точки попадают на кривые зависимости $\frac{u}{u_0}(u_0)$ для различных перегрузок. Отсюда можно заключить, что изменение размера частиц ПХА влияет на чувствительность составов к перегрузкам только через u_0 .

Данные по горению составов с различными видами связей и различным содержанием горючего не попадают на кривые рис. 7. По-видимому, кроме u_0 определенную роль в увеличении скорости горения в поле массовых сил играют физико-химические свойства горючего и количество его в составе.

Другим важным фактором, влияющим на изменение скорости горения при перегрузках, является структура (строение) «зоны». Действительно, изменение $u(a)$ в зависимости от размера частиц Al нельзя объяснить изменением u_0 , поскольку для составов с d_{Al} , равным 20 и 250 мк, статические скорости горения равны, а чувствительность к перегрузкам различна. По-видимому, существенную роль здесь играет агломерация исходных частиц Al. В работах [12, 13] показано, что в статических условиях горение модельных составов сопровождается агломерацией порошка Al на поверхности горения. Составы с мелким алюминием в большей степени подвержены агломерации, которая приводит к заметному увеличению времени горения агломерированных частиц алюминия [14]. В условиях перегрузок агломерация алюминия на поверхности в значительной степени снижает увеличение скорости горения.

Проверкой этого предположения явились опыты с добавками Ti и W в смеси ПХА+ПЭ (см. рис. 10). Температура горения этой смеси равна 2990°С. В отличие от Al и Ti вольфрам в «зоне» плавиться не будет и, следовательно, не будет агломерировать. Температуры плавления Al, Ti и W соответственно равны 600, 1710, 3360°С. (Подробно механизм горения составов с добавкой W рассмотрен в работе [11].) Тепловые эффекты при сгорании этих металлов на один грамм металла соответственно равны 7,4; 4,7; 1,08 ккал [14]. Казалось, что состав с 10% Al должен был дать тот же эффект, что и с 16% Ti или 70% W. Однако близкие значения дали составы, содержащие Ti и Al, а состав с добавкой только 13% W существенно увеличил скорость горения. Если предположить, что при горении состава с добавкой W все выделившееся тепло в «зоне» идет на увеличение скорости горения, то из данных наших опытов следует, что при агломерации Al и Ti теряется (при $a=1000$ г) около 70% скорости горения от максимально возможной.

Можно было предположить два механизма увеличения скорости горения при перегрузке: за счет увеличения эффективной теплопроводности в «зоне» и за счет повышения температуры в «зоне» вследствие горения алюминия. Опыты по горению составов с добавкой Al_2O_3 позволяют оценить эти эффекты. Как видно из рис. 9, основную роль в увеличении скорости горения играет тепло, выделившееся в «зоне» в результате сгорания Al. Доля увеличения скорости горения за счет сгорания Al составила 70%, за счет увеличения эффективной теплопроводности — только 30%.

Введение в состав частиц Al размером 0,3 мк приводит к тому, что существенно увеличивается u_0 . Объясняется это тем, что частицы таких размеров сгорают вблизи поверхности горения [15, 16], поэтому перегрузки уже не могут существенно увеличить скорость горения. Незначительное увеличение скорости горения в этом случае можно объяснить увеличением эффективной теплопроводности вследствие большого количества остатка на поверхности.

Опыты по горению состава ПХА+П+Al показали, что относительная скорость горения от давления не зависит.

Для объяснения увеличения скорости горения алюминизированных топлив при наличии перегрузки было предложено несколько физических моделей. Так, в работах [16, 17] увеличение скорости горения объясняется дополнительным теплопритоком из газовой фазы к поверхности топлива через химически неактивные частицы, удерживаемые массовыми силами. Однако опыты с добавкой Al_2O_3 показывают, что увеличение скорости горения в большей степени связано с горением Al на поверхности составов.

Другой подход был предложен в [6]. Модель основана на предположении, что частицы металла под действием центробежных сил удерживаются на поверхности и горят на ней. Полагалось, что тепло, выделяющееся в процессе сгорания частиц Al, равномерно поглощается поверхностью топлива. Основным недостатком этой модели является неучет агломерации частиц Al на поверхности, в сильной степени влияющей на зависимость $u(a)$.

Позднее эта модель была усовершенствована авторами работы [18], которые основывались на экспериментальных данных [3], показывающих, что горящие частицы Al удерживаются на дне углубления и сгорают в них. Полагалось, что Al сгорает полностью, но на увеличение скорости горения идет только энергия, выделяемая частицей в месте непосредственного соприкосновения с топливом. Однако и такая модель не объясняет многих экспериментальных фактов настоящей работы (не учитывается неполнота сгорания Al, вид топлива и т. д.).

Наиболее интересной, на наш взгляд, является модель, предложенная в [19], согласно которой частицы Al, удерживаемые перегрузками, горят с образованием капель Al_2O_3 и сливаются в крупные глобулы. При этом глобулы «плавают» над дном углублений. Температура такой капли принималась равной температуре горения. В зависимости от величины перегрузки менялся зазор между каплей и поверхностью горения, что изменяло количество тепла, передаваемое через зазор в к-фазу. Размер глобул в данной постановке оставался неизвестным, что затрудняло проверку теории экспериментом. В работе [2] эта модель была усовершенствована. Полагая, что максимальное увеличение скорости горения при перегрузках соответствует каплям минимального размера, найдено

$$\left(\frac{u}{u_0}\right)_{\max} \sim \frac{\rho_r^{0,33} \cdot a^{0,33}}{(1-\omega)^{0,55} \cdot u_0}, \quad (1)$$

где ρ_r — плотность газа; ω — содержание Al.

Минимальное увеличение скорости горения определяется максимально возможным размером удерживаемой капли. Считается, что если капля становится больше максимально возможной, то она разбивается потоком на мелкие капли, которые уносятся потоком. Для этого случая найдено

$$\left(\frac{u}{u_0}\right)_{\min} \sim \frac{\rho_r^{0,14} \cdot a^{0,43}}{(1-\omega)^{0,43} \cdot u_0}. \quad (2)$$

В работе [2] рассчитывается длина участка $L_{пр}$, на котором происходит перестройка режима горения от $\left(\frac{u}{u_0}\right)_{\max}$ до $\left(\frac{u}{u_0}\right)_{\min}$ и находится предельное значение массы, которое должно оставаться постоянным при $L > L_{пр}$.

Ниже приводится проверка теоретических расчетов работы [2] по данным проведенных экспериментов с учетом влияния каждого параметра (a , ω , u_0 , ρ_r) в отдельности.

Полагая в формуле (1) все величины, кроме a , постоянными, можно записать

$$\frac{u}{u_0} = K_1 \cdot a^{0,33}$$

Если представить экспериментальные данные в виде степенной зависимости, то показатель степени при a в значительной мере зависит от размера частиц Al. Например, для составов с 5% Al, отличающихся только размерами частиц Al, получаем, что на участке ускорений от 1 до 400 g

$$u/u_0 = 0,4 \cdot a^{0,21} \text{ для } d_{Al} = 200 \div 250 \text{ мк, } u/u_0 = 0,25 \cdot a^{0,3} \text{ для } d_{Al} = 20 \text{ мк.}$$

При $a > 400$ g показатель степени близок к нулю. Таким образом, формула (1) верно описывает зависимость $\frac{u}{u_0}(a)$ только на участке до $a = 400 \div 500$ g и размеров частиц $d_{Al} = 25$ мк.

Полагая в (1) или (2) все величины, кроме u_0 , постоянными, получим

$$\frac{u}{u_0} = \frac{K_r}{u_0},$$

что хорошо совпадает с экспериментальной зависимостью $\frac{u}{u_0}(u_0)$ при больших ускорениях (см. рис. 7).

Экспериментальную зависимость по влиянию процентного содержания Al на скорость горения состава ПХА+П+Al (см. рис. 5) можно представить в виде

$$u/u_0 = 1,58 \cdot \frac{1}{(1-\omega)^{0,66}} \text{ для } d_{Al} = 20 \text{ мк,}$$

$$u/u_0 = 1,95 \cdot \frac{1}{(1-\omega)^{0,27}} \text{ для } d_{Al} = 200 \div 250 \text{ мк.}$$

Сравнивая эти формулы с (2) и (3) при постоянных a , ρ_r и u_0 , видим, что лучшее приближение дает формула (2) для $d_{Al} = 20$ мк.

Полагая, что плотность газа пропорциональна давлению в бомбе и что скорость горения в статических условиях подчиняется закону Вьеля, из (2) находим

$$\frac{u}{u_0} \sim p^{0,33-n},$$

где n — показатель степени в законе скорости горения. Для состава ПХА+П+Al $n = 0,5$, поэтому

$$\frac{u}{u_0} \sim p^{-0,14}.$$

В соответствии с этой зависимостью увеличение давления в бомбе должно приводить к уменьшению относительной скорости горения, что не наблюдалось в наших опытах (см. рис. 1, 2).

Согласно работе [2], на образце длиной 50 мм скорость горения должна меняться от $\left(\frac{u}{u_0}\right)_{\max}$ до $\left(\frac{u}{u_0}\right)_{\min}$. Однако в наших опытах фото-регистрация процесса горения не обнаружила изменения скорости горения (до $L = 25$ мм), а на конечном участке образца она даже незначительно возрастала. Масса остатка после сгорания образцов длиной 50 мм была больше, чем при $L = 25$ мм.

Проведенный анализ работы [2] позволяет сделать вывод о том, что физические предположения, заложенные в модели, оправданы для составов с частицами $d_{Al} = 20$ мк и при перегрузках до $400 \div 500$ g.

Модель не объясняет медленный рост скорости горения при больших перегрузках, не учитывает зависимости скорости горения от размеров порошка Al, вида и количества горючего.

На основании приведенных выше экспериментальных данных можно сделать некоторые выводы о механизме влияния перегрузок на скорость горения алюминизированных смесевых составов.

При воздействии перегрузок частицы алюминия остаются вблизи поверхности горения, агломерируют и горят с образованием капель Al_2O_3 , как это было предложено в работах [2, 19]. С ростом перегрузок все большее число частиц Al_2O_3 остается вблизи поверхности и не уносится газовым потоком (по мере роста перегрузок увеличивается масса остатка). Тепловой поток к к-фазе растет как вследствие увеличения концентрации у поверхности высокотемпературных капель окиси алюминия, так и вследствие уменьшения зазора между ними и поверхностью горения. При достаточно больших перегрузках (при $a=400-500 g$) над поверхностью горения образуется жидкий кипящий слой¹. При этих перегрузках слой прижимается к поверхности горения, фиксируя тем самым температуру на поверхности к-фазы. Величина скорости горения $u_{пр}$ при этом определяется реакцией в к-фазе при заданной температуре поверхности. Отклонение состава смеси от стехиометрического ведет к снижению тепловыделения в к-фазе и, следовательно, к уменьшению значения $u_{пр}$. Для составов с легко газифицируемыми компонентами реакция в к-фазе, вероятно, протекает более интенсивно, что увеличивает значение $u_{пр}$ (см. рис. 8).

В заключение авторы благодарят А. Г. Мержанова и Ю. В. Фролова за обсуждение результатов.

Поступила в редакцию
10/VII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Максимов, Б. Б. Серков, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1968, 4, 4.
2. С. К. Орджоникидзе, А. Д. Марголин и др. ФГВ, 1971, 7, 4.
3. Northam, Lusu. AJAA Paper, 530, 1968.
4. Northam, Burton. AJAA Paper, 126, 1970.
5. Андерсон, Райхенбах. РТК, 1968, 6, 2.
6. Штурм, Райхенбах. РТК, 1969, 7, 11.
7. Кроу, Виллугби. ВРТ, 1967, 1.
8. Нортам. РТК, 1971, 9, 12.
9. Э. И. Максимов, Ю. М. Максимов, В. Ф. Чуков. ФГВ, 1971, 7, 2.
10. Ю. М. Максимов, Э. И. Максимов. ФГВ, 1972, 8, 4.
11. В. И. Юхвид, Э. И. Максимов, В. С. Козлов. ФГВ, 1974, 10, 2.
12. П. Ф. Похил, В. С. Логачев, В. М. Мальцев. ФГВ, 1970, 6, 1.
13. А. Ф. Беляев, Б. С. Ермолаев и др. ФГВ, 1969, 5, 2.
14. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., «Наука», 1972.
15. Н. Н. Бахман, Ю. А. Кондрашков. ЖФХ, 1963, 37, 216.
16. Б. И. Гончаренко, Б. Т. Ерохин и др. 2-й Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву, 1969.
17. Б. А. Райзберг, Б. Т. Ерохин, К. П. Самсонов. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. М., «Машиностроение», 1972.
18. Глик, Ходж, Кавени. ВРТ, 1968, 2.
19. Виллугби, Кроу, Бейкер. ВРТ, 1969, 7.
20. L. A. Watermeir, W. P. Aungust, S. P. Pfalt. 9-th Symposium (International) on Combustion. N. Y. L. Academic. Press. 1963.
21. Д. Р. Симс, Д. Е. Крамп, А. С. Ли. ВРТ, 1962, 42, 3.

¹ Возможность существования жидкого слоя металла на поверхности топлива подтверждают экспериментальные данные работ [20, 21]. Замечено, что в специальных условиях (при $a=1g$) поверхность горящего топлива была покрыта пленкой расплавленного металла, отлетающего от поверхности в виде больших капель.