

**ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ ТЕРМОМЕТР СОПРОТИВЛЕНИЯ
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОХА ПРИ БЫСТРОМ НАГРЕВЕ**

B. F. Михеев, C. C. Хлевной, A. B. Худяков
(Новосибирск)

Одной из важных характеристик процесса воспламенения твердого ракетного топлива является температура на его поверхности к моменту воспламенения при различных начальных условиях и различных способах подвода энергии к поверхности топлива. В имеющихся к настоящему времени исследованиях нагрев образцов топлив осуществлялся либо лучистой энергией различной интенсивности [1—3], либо горячими газами при воспламенении в потоке [4, 5] и в ударных трубах [7, 8], либо в атмосфере нагретого газа (различного состава) с одновременным воздействием термической радиации [9]. В большинстве указанных работ температура на поверхности образцов пороха вычислялась путем решения подходящих случаю тепловых задач.

Использование датчиков температуры, толщина которых составляет несколько десятков микрон, сильно искажает температурные кривые при имеющихся у поверхности больших градиентах, и чем интенсивнее подвод энергии к поверхности, тем эти искажения больше, поскольку при этом толщина прогретого слоя уменьшается.

Измерить температуру на поверхности можно, используя ее инфракрасное излучение. Этот метод был применен для определения температуры на поверхности при горении смесевых топлив и некоторых их компонент при пониженных давлениях [10—12]. Достоинство метода состоит в том, что на поверхность топлива не вводится датчик, при этом регистрируется средняя картина по всей исследуемой поверхности образца.

Недостатком метода является трудность удаления уходящих с поверхности продуктов испарения или разложения топлива, искажающих картину явления.

Поскольку наибольший интерес представляет исследование воспламенения топлив при быстрых нагревах (время воспламенения $\sim 10^2$ сек), что близко к реальным условиям воспламенения в твердотопливных ракетных двигателях, то возникает необходимость изготовления датчика, который давал бы наименьшие искажения температурных кривых.

В данной работе излагается методика непосредственного измерения температуры на поверхности пороха при очень быстром нагреве (например, световым излучением) с помощью пленочного термометра сопротивления (ПТС), датчик которого размещается на нагреваемой поверхности и представляет собой металлическую пленку толщиной $\sim 0,5 \mu$ и шириной $\sim 0,2 \div 0,3$ мм.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПТС

Для изготовления тонкой металлической пленки был применен электролитический метод. В качестве термометрического материала выбран никель с учетом того, что в гальванотехнике методы осаждения никеля довольно подробно разработаны. Осаждение никеля проводилось в электролитической ванне следующего состава [13]: сернокислый никель (х. ч.) — 120 г/л, хлористый аммоний (х. ч.) — 23 г/л, борная кислота (х. ч.) — 26 г/л. Температура электролита — комнатная, плотность тока $\sim 0,5 \text{ а/дм}^2$, время осаждения — 15 мин. Катодом служил специальный шаблон, изготовленный из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т. Конструкция катода практически аналогична описанной в [14] (рис. 1) и примененной для изготовления электролитических термопар

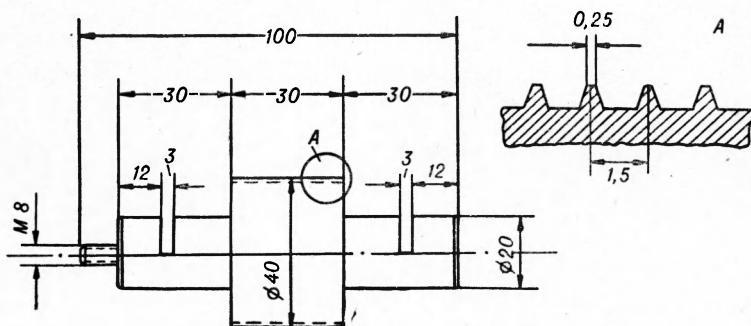


Рис. 1. Катод для электролитического осаждения никелевых пленок.

медь — никель (толщина $2\div4 \mu$). Ширина дорожек, на которые осаждался никель, составляла 0,25 мм. Поверхность дорожек весьма тщательно полировалась, а промежутки между ними заполнялись шеллаком, растворенным в этиловом спирте. Анодом служила никелевая пластина, и площади анода и катода были примерно одинаковыми. После осаждения катод промывался дистиллированной водой и высушивался. Никелевые пленки осторожно снимались с дорожек остро отточенным лезвием и расправлялись на смоченных водой предметных стеклах. Для снятия напряжений, получающихся в пленках при осаждении, стекла с пленками помещали в сушильный шкаф, где они выдерживались при температуре $150\div170^\circ\text{C}$ в течение нескольких часов.

После этого никелевая пленка готова для использования в качестве термометра сопротивления. Оценка толщины полученных никелевых пленок проводилась двумя способами.

1. Никель осаждался при описанных выше условиях на облегченный шаблон, площадь дорожек которого и вес до осаждения известны.

По привесу шаблона после осаждения никеля можно определить толщину пленки. По результатам пяти измерений средняя толщина пленки составляла 0,5 μ .

2. Рассчитывалась средняя толщина по зависимости проводимости металлической пленки от толщины при известной ее геометрии. Вычисления проводились по формуле Фуша [15] для случая, когда толщина пленки много больше длины свободного пробега электрона. Оценка по этой формуле дает толщину пленок, не превышающую 0,3 μ .

ГРАДУИРОВКА ПТС

Для градуировки никелевые пленки припаивались свинцом к медным шинам, имеющим сечение $\sim 10 \text{ mm}^2$. Длина ПТС составляла $\sim 16 \div 17 \text{ mm}$. После припайки удлинительных экранированных проводов пять пленочных термометров помещались в пробирки, заполненные цилиндровым маслом.

Удлинительные провода присоединялись к переключателю ПМТ с тем, чтобы сопротивление каждой пленки последовательно (вместе с шинами и удлинительными проводами) можно было измерять с помощью моста. Для того чтобы исключить сопротивление подводящих цепей, был изготовлен «холостой» образец, т. е. в пробирку с маслом была заключена медная шина без пленки, имеющая такое же сопротивление, как и шины, к которым пленки припаивались. Все удлинительные провода от шин до переключателя имели одинаковое сопротивление. Схема образцов для градуировки приведена на рис. 2. Все шесть пробирок помещались в термостат И-8.

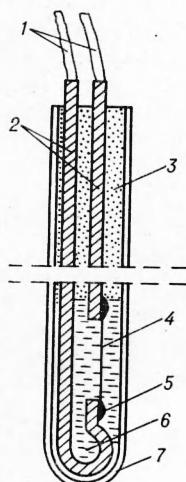


Рис. 2. Пленочный термометр сопротивления, подготовленный к градуировке.

1 — подводящие провода; 2 — медные шины; 3 — обмотка из шнурового асбеста; 4 — никелевая пленка; 5 — место припайки ПТС к шинам; 6 — масло «Вапор», заполняющее пробирку; 7 — стеклянная пробирка.

Для контроля температуры в пробирках (все пробирки одинаковы) в «холостую» шину заделывалась термопара манганин — константан (толщина 0,1 миллиметра) на уровне середины пленки. Изменения сопротивления пленочных термометров начинались после того, как показания термопары, фиксируемые потенциометром ПП-1, соответствовали заданной температуре.

Измерения проводились на двойном мосте Р329 при токе через пленку в 6 мА. Для исключения паразитных э. д. с. на контактах измерения проводились при прямом и обратном направлениях тока. Величина сопротивления каждой пленки представляла собой среднее из этих измерений.

На графике (рис. 3) представлены результаты измерений сопротивления в зависимости от температуры. Каждая точка представляет собой среднее значение для 5 \div 10 пленок. Наибольшие среднеквадратические отклонения от средних значений $\frac{R_t}{R_0}$ получились при температурах 280 и 300° С и составляют $\pm 2\%$.

Известно, что термический коэффициент сопротивления α для тонких металлических пленок значительно отличается от α для массивных образцов тех же металлов [16, 17]. Вычисление этого коэффициента для

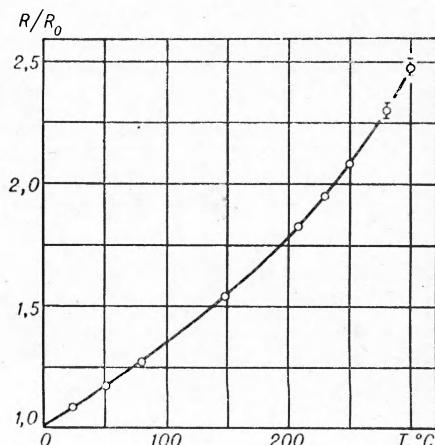


Рис. 3. Градуировочная кривая для ПТС из никеля.

описываемых пленок в интервале температур $0\text{--}24^\circ\text{C}$ дает значение $\alpha=3,28 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$, в то время как для сплошного металла $\alpha \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ПОРОХА С ПТС

Образцы пороха представляют собой таблетки диаметром 20 мм и толщиной 7 мм. По боковой поверхности таблетки делаются две параллельные лыски с тем, чтобы база пленочного термометра сопротивления составляла 16 мм. После такой обработки образец приклеивается kleem БФ-2 к текстолитовой подставке, имеющей длину 25 мм и аналогичный пороховому образцу профиль поперечного сечения. Когда образец прочно приклеился к подставке, на него наклеивается ПТС, порохом, растворяющимся в поверхностном слое ацетоном.

Пленка заклеивается заподлицо с поверхностью образца, поскольку вклеивание ее происходит одновременно с притиркой поверхности пороха к полированному оптическому стеклу, смоченному ацетоном. Образцы выдерживаются при комнатной температуре не менее недели с тем, чтобы ацетон полностью улетучился с поверхности образца.

После этого к текстолитовой подставке крепятся плоские медные шины, имеющие размеры $5 \times 0,5 \times 50$ мм, таким образом, чтобы их концы подходили почти вплотную к концам пленки, свисающим с образца (рис. 4). Концы пленки утапливаются на концах шин в каплях олова, обеспечивая надежный контакт. К противоположным концам шин подпаиваются удлинительные провода, которые подводятся к регистрирующему устройству. Сопротивление всех подводящих цепей $\sim 0,15$ ома, что составляет не более 0,8% от сопротивления пленочного термометра при нормальной температуре и не более 0,4% при температуре 230°C .

ОЦЕНКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАЗОГРЕВА ПТС

Начальное сопротивление пленочного термометра составляет $17\text{--}25$ ом. При включении в измерительную схему по нему проходит постоянный ток в 6 ма. Необходимо рассмотреть вопрос о предварительном нагреве пленки за счет джоулева тепла.

С этой целью пороховой образец, на который уже вклейены ПТС, подключался к двойному мосту Р329, а затем измерялись сопротивления термометров при различных токах через датчик.

Измерение сопротивления проводилось сразу и через 5—9 мин после включения ПТС в цепь.

Второй ряд измерений полностью соответствует условиям эксперимента, поскольку на различные подготовительные операции после включения образца уходит примерно такое же время. Кроме того, как показали измерения, за это время устанавливается стационарный теплообмен между пленкой, на которой выделяется джоулево тепло, и пороховым образцом, в который она вклейена, т. е. через 5—9 мин сопротивление пленки перестает увеличиваться и остается постоянным.

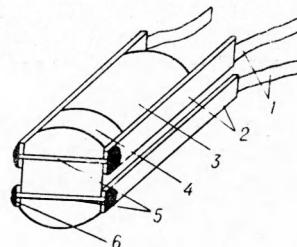


Рис. 4. Образец пороха, подготовленный к опыту.
1 — подводящие провода; 2 — медные шины; 3 — текстолитовая подставка; 4 — пороховой образец; 5 — пленочные термометры сопротивления; 6 — место припайки ПТС к шинам.

Ток через пленку изменялся от 1 до 30 мА. При величине тока 1 мА сопротивление ее не изменялось и было одинаковым как сразу после включения тока, так и через 10 мин.

На графике (рис. 5) приведены результаты измерений $\left(\frac{R_I}{R_1}\right)_\tau$ в зависимости от силы тока для трех ПТС. По этим данным можно заключить, что даже при токе в 30 мА сопротивление пленочного термометра изменяется на 1,6%, а при выбранном в опытах режиме измерения ($I=6$ мА) это изменение составляет 0,1%, т. е. предварительный разогрев термометра практически исключается. В процессе опыта дополнительного нагрева термометра тоже не должно быть по двум причинам:

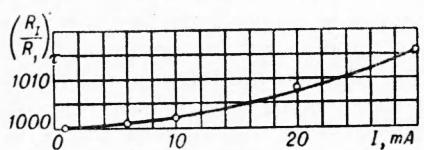


Рис. 5. Зависимость сопротивления ПТС от величины тока через него (предварительный разогрев).

R_I — сопротивление ПТС при различных токах; R_1 — сопротивление пленок при токе в 1 мА; $\tau=5$ мин.

1) время опыта мало и составляет десятые доли секунды;

2) при увеличении сопротивления термометра за счет разогрева поверхности пороха внешним источником и за счет тепла экзотермических реакций в самом порохе ток через ПТС уменьшается.

РЕГИСТРИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА И ЗАПИСЬ КРИВЫХ РАЗОГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОХА ПЕРЕД ВОСПЛАМЕНЕНИЕМ

Для графической регистрации изменения сопротивления ПТС при нагреве используется шлейфный осциллограф Н-700 с предварительным 3-канальным усилителем¹.

Усилитель (рис. 6) собран на двух транзисторах. Первый каскад на транзисторе T_1 представляет собой преобразователь и предварительный усилитель, собранный по схеме с общим эмиттером, второй каскад на транзисторе T_2 с сопротивлениями R_{10} , R_{12} , R_{13} , R_{14} образует мост постоянного тока.

Сопротивление R_{12} служит для установки нуля. Чувствительность усилителя (S_y) равна 0,025 мА/ом, полоса пропускания (ΔF) — 10 кГц при коэффициенте нелинейных искажений $\gamma \leq 0,5\%$ и изменении сопротивления ПТС от 10 до 100 ом. Начальный ток через ПТС составляет 6 мА. Переключатель Π_1 служит для калибровки прибора, Π_2 — для выбора режима работы (калибровка — измерение), K_1 — для включения калибровки, Π_3 — переключатель микровольтметра. (Измерительный прибор может быть подключен на выход к любому из трех каналов; в положениях B_1 , B_2 , B_3 осуществляется контроль источников питания.) Калибровка устройства осуществляется с помощью калибровочных сопротивлений R_1 — R_6 , подключаемых на вход прибора с помощью переключателя Π_1 и кнопки калибровки K_1 ; переключатель Π_2 при этом ставится в положение «калибровка».

Запись калибровочного сигнала показана на рис. 7.

После калибровки калибровочное устройство отключается, для чего переключатель Π_2 ставится в положение «работа», при этом ко входу моста подсоединяется ПТС.

¹ Далее дается описание одного канала.

Отклонение луча осциллографа от нулевой линии (при калибровке она соответствует 20 ом) при подключении ПТС есть мера начального сопротивления ПТС, которое рассчитывается по калибровочной кривой.

Работа пленочного термометра сопротивления проверялась при нагреве до воспламенения образцов нитроглицеринового пороха Н+сажа лучистой энергии на световой установке [18].

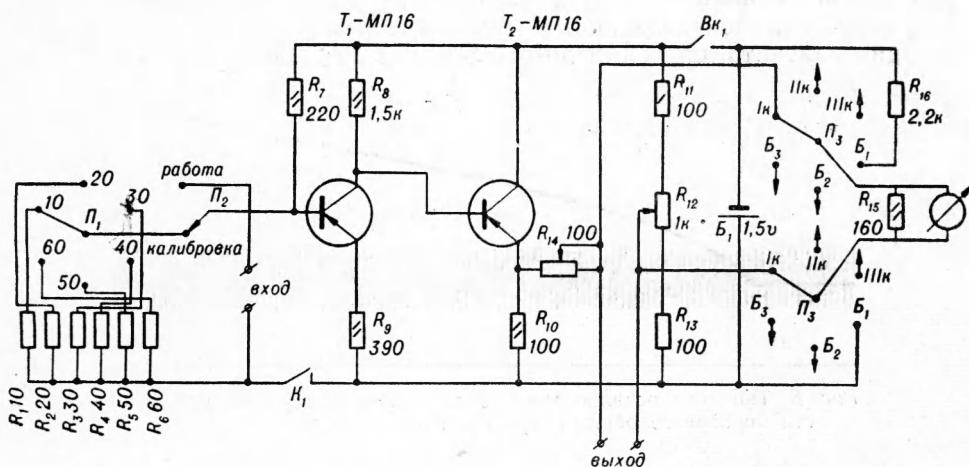


Рис. 6. Схема одного канала термометрического моста.

Типичная осциллограмма записи температуры поверхности пороха для $q_0 \approx 1$ кал/см² · сек приведена на рис. 8. Метки времени соответствуют частоте 10 гц. Световая установка может дать равномерный и постоянный поток до 12–14 кал/см² · сек. При таких интенсивностях

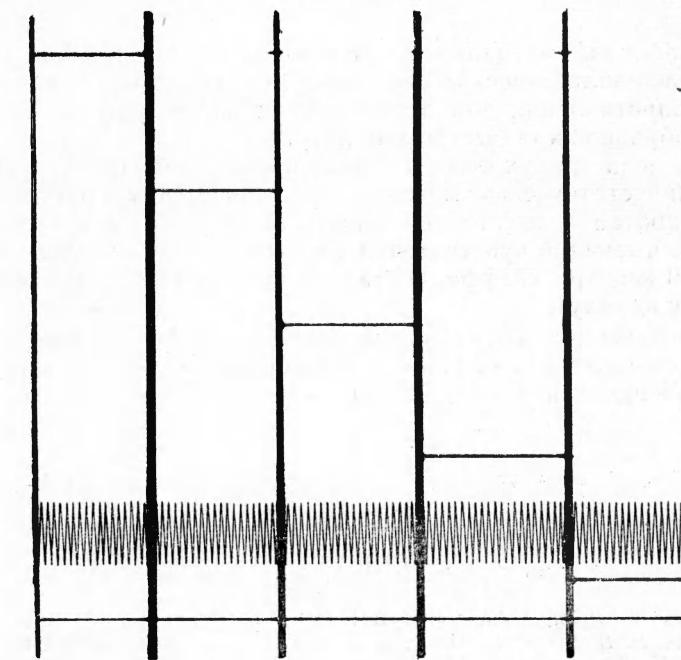


Рис. 7. Градуировка одного канала термометрического моста на шлейфном осциллографе Н-700.

нагрев поверхности пороха Н+сажа до воспламенения осуществляется за время $0,1 \div 0,3$ сек.

Естественно, что в этих условиях возможности разработанных пленочных термометров сопротивления далеко не исчерпываются, поскольку они в состоянии «следить» за изменениями температуры поверхности, происходящими за время ~ 10 мксек [19]. Поэтому никелевые ПТС целесообразно использовать при быстрых нагревах поверхности пороха, например, с помощью мощных дуговых отражательных печей, позволяющих получить плотности потока энергии $10 \div 100$ кал/см² · сек.

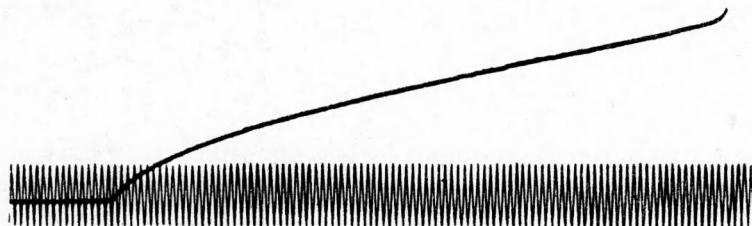


Рис. 8. Типичная осциллограмма записи температуры на поверхности порохового образца при его нагреве до воспламенения.

Авторы выражают глубокую благодарность Воеводченко Т. Ф., Дьячкову В. П. и Думаеву М. С. за большую помощь в изготовлении и испытании ПТС, а также всем сотрудникам лаборатории за участие в обсуждении данной работы и полезные замечания.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика изготовления тонких пленок ($0,5\text{ }\mu$) из никеля гальванопластическим методом, используемых в качестве термометров сопротивления для регистрации температуры на поверхности пороховых образцов при быстром их нагреве.
2. Проведена градуировка тонкопленочных никелевых термометров сопротивления статическим методом в интервале температур $0 \div 300^\circ\text{C}$.
3. Разработан и изготовлен 3-канальный термометрический мост с усилением, имеющий чувствительность $0,025\text{ ma/ом}$ и полосу пропускания более 10 кгц при коэффициенте нелинейных искажений менее $0,5\%$ (по каждому каналу).
4. Проведены предварительные эксперименты по воспламенению баллиститного пороха Н+сажа с использованием пленочного термометра сопротивления для записи температуры на поверхности.

Поступила в редакцию
17/XI 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. A. D. Baer, N. W. Ryan. AIAAJ., 1965, 3, 5, 884.
2. M. W. Evans, R. B. Beyer, L. McCulley. Chem. Phys. J., 1964, 40, 9, 2431.
3. Р. Б. Беэр, Н. Фишман. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». ИЛ, 1963.
4. S. W. Churchill, R. W. Kruggel, J. C. Brier. A. I. Ch. E. J., 1956, 2, 568.

5. А. Д. Бер, Н. В. Райан, Д. Л. Солт. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». ИЛ, 1963, стр. 416.
6. Р. Ф. Мак-Алеви, П. А. Кауан, М. Саммерфильд. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». ИЛ, 1963.
7. M. Summerfield, R. F. McAlevy. Jet propulsion, 1958, 66, 478.
8. M. A. Cook, F. A. Olson. A. I. Ch. E. J., 1955, 1, 391.
9. J. F. Roth, G. P. Wachtell. Industr. and Eng. Chem., 1962, 1, 1, 62.
10. J. Powling, W. A. W. Smith. Comb. Flame, 1962, 6, 3.
11. E. A. Arden, J. Powling, W. A. W. Smith. Comb. Flame, 1962, 6, 1.
12. J. Powling, W. A. W. Smith. Comb. Flame, 1963, 3, 3, 269.
13. Б. Бартфау. Справочник гальваностега. Машгиз, 1960.
14. Г. Е. Ожегов. Сб. «Тепло- и массоперенос», т. I. Минск, 1962.
15. I. G. Naik, E. M. Balsara. Ind. J. Phys. 1957, 31, 12, 62.
16. И. Д. Конозенко. Усп. физ. наук, 1954, 52, 4, 561.
17. R. E. Thun, G. F. Gaunde, E. R. Pascuitti. RSI, 1960, 31, 4, 446.
18. Э. В. Конев, С. С. Хлевной. ПМТФ, 1963, 2, 167.
19. Ю. А. Поляков, Е. А. Мит'кина. ПТЭ, 1961, 4, 140.