

УДК 536.46.1:532.517.4

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКОГО УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТРЕНИЕМ

X.-Y. Liang<sup>1,2</sup>, G.-B. Mi<sup>2</sup>, P.-J. Li<sup>1</sup>, J.-X. Cao<sup>2</sup>, X. Huang<sup>2</sup><sup>1</sup>Университет Цинхуа, Пекин 100084, Китай<sup>2</sup>Пекинский институт авиационных материалов, Пекин 100095, Китай, miguangbao@163.com

Разработана фрикционная модель зажигания, основанная на теории теплового взрыва Семенова для гетерогенной реакции. Изучено влияние концентрации кислорода, скорости потока, силы трения и площади контакта на критическую температуру воспламенения двух огнестойких титановых сплавов ТВ12 и TF550. Результаты расчетов показывают, что критическая температура уменьшается с увеличением концентрации кислорода в обтекающем потоке, но возрастает при повышении его скорости. Критическая температура возрастает приблизительно линейно с увеличением силы трения и экспоненциально уменьшается с увеличением радиуса контактной зоны. При увеличении радиуса контактной зоны до 0.007 м критические температуры сплавов TF550 и ТВ12 составляют 1029 и 1016 К соответственно, а при достижении радиуса контактной зоны 0.014 м — 962 и 960 К соответственно.

Ключевые слова: титановые сплавы, критическая температура, математическая модель, гетерогенная реакция.

DOI 10.15372/FGV20200510

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из тенденций развития передовых технологий авиационных двигателей является повышение отношения тяги к весу, которое достигается за счет увеличения температуры, давления и скорости потока внутри компрессора, что, в свою очередь, повышает вероятность возникновения самовозгорания титанового сплава. Ввиду этого, пристальное внимание уделяется проблеме зажигания титановых сплавов [1, 2], существует также настоятельная потребность в создании огнестойкого титанового сплава и в разработке технологии обработки его поверхности.

В [3] проведены испытания на растяжение при горении образцов в виде полос и листов титановых сплавов для различных условий окисления. При разрыве образцов с применением растягивающего усилия воспламенение происходило на поверхности разрушения. Растворимость кислорода в расплавленных титановых сплавах связана с критической тем-

пературой воспламенения. Испытание на разрушение образцов из титанового сплава [4] показало, что поверхность металлического образца, подвергнутая воздействию кислорода, вступает в экзотермическую реакцию, а скорость тепловыделения влияет на горение титанового сплава. При критических давлениях и температурах воспламенения механическое разрушение (например, растяжение, изгиб, удар и т. д.) образцов приводило к тому, что поверхность разрушенного металла подвергалась воздействию кислорода, что, в свою очередь, приводило к сильной реакции окисления и сторианию. Растворимость различных газов также существенно влияла на горение титановых сплавов. Теория окисления металлических поверхностей Семенова была усовершенствована в работах [5, 6], в которых получено уравнение для расчета критических условий воспламенения металлических частиц. В [7, 8] показано, что кинетические параметры горячей точки такие же, как у реагентов. Критическое условие воспламенения получено в [9, 10] при анализе зависимости между толщиной оксидного слоя и критической температурой. Было обнаружено, что при радиусе металлической частицы, равном приблизительно 8 мкм, происходит скачок температуры. На основе этих данных в [11] теоретически рассчитано критиче-

© Liang X.-Y., Mi G.-B., Li P.-J., Cao J.-X., Huang X., 2020.

<sup>1</sup>National Center of Novel Materials for International Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China. <sup>2</sup>Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Titanium Alloys, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China.

ское условие для частиц титана, а в [12] при дополнительном привлечении механизма окисления и матирования получено уравнение кинетики окисления титана в воздушной среде. Исходя из теории теплового взрыва Семенова для гетерогенной реакции в [13–15] рассчитаны критическая температура и давление в условиях разрушения. Эффективность огнестойкого титанового сплава изучалась в [16–18] фрикционным методом при изменении концентрации кислорода.

Однако в модели Семенова не рассматривается изменение критического условия воспламенения, вызванное трением при высокой температуре. Поэтому, для того чтобы разработать математическую модель критических условий на основе теории самовоспламенения Семенова для гетерогенных реакций, в уравнение был введен так называемый фрикционный тепловой источник. Эта модель имеет важное значение для прогнозирования критической температуры воспламенения титановых сплавов в сложных условиях, например, в таких, как в авиационных двигателях.

## 1. МОДЕЛЬ

### 1.1. Физическая модель

Как показано на рис. 1, трение возникает на контактной поверхности во время высокоскоростного вращения ротора. Трением генерируется источник тепла. Воспламенение происходит после того, как температура зоны реакции достигает критического значения. Диссипация тепла в зоне реакции осуществляется за счет конвективной теплопередачи.

В модели используются следующие допущения: упругой деформацией материала можно

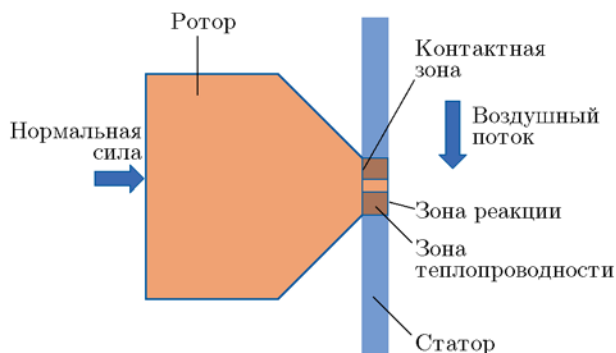


Рис. 1. Принципиальная схема испытания на трение

пренебречь; скорость потока и скорость вращения ротора постоянны; площадь зоны реакции горения постоянна. В предыдущих работах было обнаружено, что теплопроводностью в зоне контакта также можно пренебречь, поскольку толщина образца составляет всего 2 мм. Скорость потока влияет только на рассеивание тепла. Для изучения влияния различных материалов были выбраны два типичных огнестойких титановых сплава TB12 и TF550, номинальные составы которых  $\text{Ti}-25\text{V}-15\text{Cr}-0.2\text{Si}$  и  $\text{Ti}-35\text{V}-15\text{Cr}-0.3\text{Si}-0.1\text{C}$  соответственно.

### 1.2. Теоретическая модель

Согласно теории теплового взрыва Семенова для гетерогенной реакции, сгорание происходит в том случае, когда тепловыделение в зоне реакции горения равно теплоотводу и производные тепловыделения и теплоотвода по температуре равны. Температура в этих условиях называется критической  $T_{cr}$ . Соответствующие уравнения записываются в виде

$$Q_G = Q_L, \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_G}{\partial T} = \frac{\partial Q_L}{\partial T}, \quad (2)$$

где  $Q_G$  — тепловыделение,  $Q_L$  — теплоотвод.

При испытании на трение тепловыделяющая часть состоит из реакционного тепла и теплоты трения, а теплоотвод равен теплопереносу:

$$Q_G = Q_F + Q_H, \quad (3)$$

$$Q_L = Q_C, \quad (4)$$

где  $Q_F$  — тепловыделение при трении,  $Q_H$  — теплота реакции,  $Q_C$  — конвективный поток с поверхности.

Генерирование теплоты трения  $Q_F$  кольцевой контактной поверхностью может быть рассчитано по кулоновской модели

$$Q_F = \frac{2}{3} \pi \tau \omega (R_1^3 - R_2^3), \quad (5)$$

$$\tau = \mu N, \quad (6)$$

где  $\tau$  — сила трения,  $\mu$  — коэффициент трения,  $N$  — нормальное напряжение на поверхности контакта,  $\omega$  — угловая скорость ротора,  $R_1$  —

внешний радиус кольца,  $R_2$  — внутренний радиус кольца.

Для упрощения расчета в рассмотрение введен параметр

$$D = N \frac{2}{3} \pi \omega (R_1^3 - R_2^3). \quad (7)$$

Тогда

$$Q_F = \mu D. \quad (8)$$

В процессе высокотемпературного трения коэффициент трения уменьшается с ростом температуры и его можно аппроксимировать линейной функцией температуры. Уравнение имеет вид

$$\mu = F + BT. \quad (9)$$

Теплота реакции в зоне высокотемпературного окисления ювенильной поверхности записывается в виде

$$Q_H = wqS_r. \quad (10)$$

Здесь  $S_r$  — площадь реакционной зоны сгорания,  $q$  — удельная теплота реакции,  $w$  — прирост массы в единицу времени, рассчитываемый по уравнению [13]

$$w = \frac{P^{0.5}}{(1 + aP_{N_2}^{0.5})(P_{0.1})^{0.5}} k \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (11)$$

где  $P$  — парциальное давление кислорода,  $P_{N_2}$  — парциальное давление азота,  $P_{0.1}$  — давление кислорода в воздухе,  $a$  — коэффициент адсорбции. Комбинируя уравнения (10) и (11), можно записать

$$Q_H =$$

$$= qS_r \frac{P^{0.5}}{(1 + aP_{N_2}^{0.5})(P_{0.1})^{0.5}} k \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (12)$$

Введем обозначение  $A$ :

$$A = qS_r \frac{P^{0.5}}{(1 + aP_{N_2}^{0.5})(P_{0.1})^{0.5}} k. \quad (13)$$

Тогда уравнение (12) можно записать в виде

$$Q_H = A \exp(-E/RT). \quad (14)$$

Уравнение диссипации тепла на поверхности реакционной зоны горения описывается выражением

$$Q_C = \alpha S_d (T - T_1). \quad (15)$$

Здесь  $S_d$  — площадь поверхности теплоотдачи,  $\alpha$  — суммарный коэффициент теплопередачи:

$$\alpha = h/2, \quad (16)$$

где  $h$  — коэффициент теплопередачи поверхности:

$$h = \frac{Nu\lambda}{d}, \quad (17)$$

$Nu$  — число Нуссельта,  $\lambda$  — теплопроводность,  $d$  — диаметр камеры испытательного устройства.

В условиях вынужденной конвекции число  $Nu$  рассчитывается по эмпирическому уравнению:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, \quad (18)$$

где  $Pr$  — число Прандтля,  $Re$  — число Рейнольдса:

$$Re = \rho v d / \eta. \quad (19)$$

Введем обозначение

$$G = \alpha S. \quad (20)$$

Тогда подстановка уравнений (8), (14), (15) в уравнения (1), (2) приводит к выражениям

$$\begin{aligned} D(F + BT_{cr}) + A \exp(-E/RT_{cr}) = \\ = G(T_{cr} - T_1), \end{aligned} \quad (21)$$

$$DB + \frac{EA \exp(-E/RT_{cr})}{RT_{cr}^2} = G. \quad (22)$$

Уравнение (22) преобразуется к виду

$$A \exp\left(-\frac{E}{RT_{cr}}\right) = \frac{R}{E} (G - DB) T_{cr}^2 \quad (23)$$

После подстановки уравнения (23) в (21) и ряда упрощений приходим к выражению

$$\frac{R}{E} T_{cr}^2 - T_{cr} + \frac{GT_1 + DF}{G - DB} = 0. \quad (24)$$

Разрешая уравнение (24) относительно  $T_{cr}$ , получаем

$$T_{cr} = \frac{E}{2R} \left( 1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{R}{E} \frac{GT_1 + DF}{G - DB}} \right). \quad (25)$$

Таблица 1

Тепловые свойства титановых сплавов

Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)	Удельная теплота реакции $q$ , МДж/кг	Предэкспоненциальный множитель $k$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Энергия активации $E$ , кДж/моль
17.8	493	28.4	0.29	44.5

Таблица 2

Начальные граничные условия расчетной модели

Нормальная компонента силы трения $F_N$ , Н	Толщина $\varphi$ , мм	Диаметр камеры $d$ , мм	Радиус, мм		Угловая скорость ротора $\omega$ , рад/мин	Концентрация кислорода $C$ , %	Скорость потока $v$ , м/с
			внутренний $R_2$	внешний $R_1$			
50	2	160	0.002	0.004	5 000	21	50

Разложим член  $\sqrt{1 - 4 \frac{R}{E} \frac{GT_1 + DF}{G - DB}}$  в ряд Тейлора:

$$\sqrt{1 - 4 \frac{R}{E} \frac{GT_1 + DF}{G - DB}} \approx 1 - 2 \frac{R}{E} \frac{GT_1 + DF}{G - DB} - 2 \left( \frac{R}{E} \frac{GT_1 + DF}{G - DB} \right)^2 \quad (26)$$

и подставим (26) в уравнение (25), тогда

$$T_{cr} = \frac{GT_1 + DF}{G - DB} + \frac{R(GT_1 + DF)^2}{E(G - DB)^2}. \quad (27)$$

Введя обозначение

$$U = \frac{GT_1 + DF}{G - DB} \quad (28)$$

и подставив после этого уравнение (27) в (22), запишем критическое условие в виде

$$DB + e \frac{EA \exp(-E/RU)}{RU^2} \left( \frac{1 - 2RU}{E} \right) = G. \quad (29)$$

По сравнению с основным уравнением Семенова для гетерогенных реакций, в уравнении (29) произошла замена  $T_1$  на функцию  $U$ , которая, в свою очередь, зависит от  $T_1$ , нормальной компоненты силы и коэффициента трения. В случае равенства нулю нормальной компоненты силы трения теплота трения отсутствует и из выражения (28) следует, что  $U = T_1$ . В такой ситуации уравнение (29) совпадает с уравнением теплового взрыва Семенова.

### 1.3. Граничные условия

Граничные условия в основном включают в себя геометрические параметры образца, параметры окружающей среды и тепловые свойства материала. Подстановка параметров из табл. 1 и 2 в уравнение (29) позволяет определить критические условия [14].

Для расчета выбраны два типичных огнестойких титановых сплава ТВ12 и ТФ550 [16, 19]. Коэффициент высокотемпературного трения  $F$  в уравнении (9) равен 0.48 и 0.977, а коэффициент  $B$  равен  $-2.6 \cdot 10^{-4}$  и  $-6.56 \cdot 10^{-4}$  соответственно.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно уравнению (29) концентрация кислорода, скорость потока, нормальная компонента силы трения и начальная площадь контакта оказывают влияние на критические условия воспламенения.

### 2.1. Влияние концентрации кислорода на критическое условие

Согласно закону Аррениуса концентрация кислорода существенно влияет на скорость реакции. Взаимосвязь между концентрацией кислорода и критической температурой устанавливается путем преобразования давления кислорода в его концентрацию [16].

Как показано на рис. 2, при возрастании концентрации кислорода  $C$  до 21 % критическая температура имеет тенденцию к стабилизации. При каждом увеличении концентрации

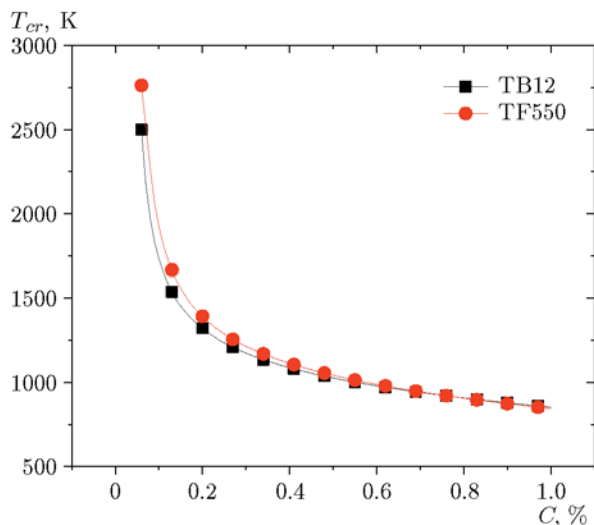


Рис. 2. Критическое условие воспламенения при различных концентрациях кислорода

кислорода на 0.01 % критическая температура падает примерно на 10 К. При  $C = 21$  % критические температуры двух сплавов отличаются примерно на 70 К. Критическая температура сплава TF550 составляет 1369 К, а сплава ТВ12 — 1302 К. Однако критические температуры сплавов TF550 и ТВ12 в среде чистого кислорода равны 844 и 853 К соответственно, что ниже примерно на 500 К критических температур этих сплавов в воздушной среде.

## 2.2. Влияние скорости потока на критическое условие

Скорость потока в основном влияет на теплоотдачу на поверхности образца. Известно, что аварии при возгорании титана происходят большей частью при скорости потока  $v = 100 \div 310$  м/с [20]. Титановый пожар гаснет при скорости потока выше 300 м/с. Поэтому для расчета выбраны скорости в пределах  $10 \div 310$  м/с. Как показано на рис. 3, критическая температура резко увеличивается в диапазоне  $v = 10 \div 50$  м/с. При  $v = 50$  м/с критические температуры сплавов TF550 и ТВ12 соответствуют 1247 и 1193 К. При  $v > 50$  м/с критическая температура имеет тенденцию к стабилизации. При  $v = 310$  м/с критические температуры сплавов TF550 и ТВ12 повышаются до 1425 и 1354 К соответственно.

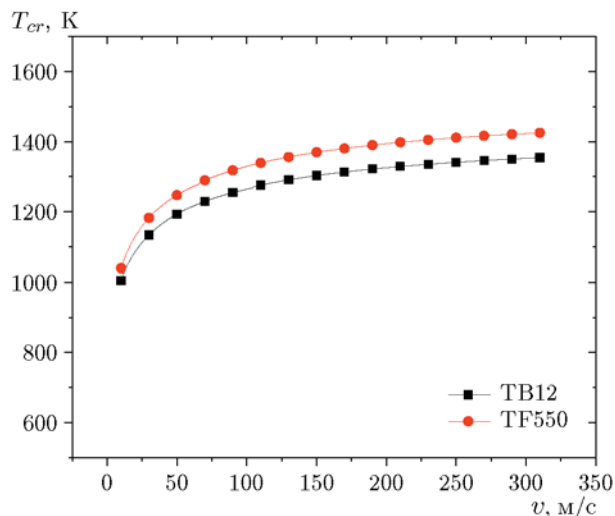


Рис. 3. Критическое условие воспламенения при различных скоростях потока

## 2.3. Влияние нормальной силы на критическое условие

В ходе расчетов исследовано влияние нормальной силы на выработку тепла трения. Согласно закону Кулона теплота трения растет с увеличением нормальной силы. Однако коэффициент трения уменьшается при повышении температуры. Как показано на рис. 4, уравнение (29) аппроксимирует уравнение Семенова в случае, когда нормальная сила равна 1 Н. Критическая температура в основном зависит от начального коэффициента трения.

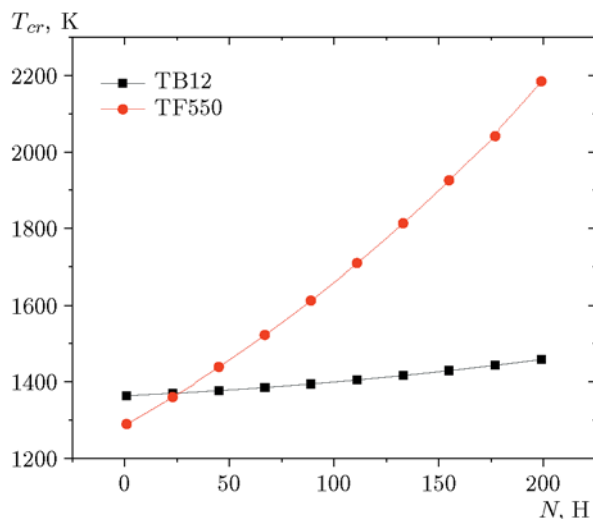


Рис. 4. Критическое условие воспламенения при различных значениях нормальной силы

Для сплавов TF550 и ТВ12 она равна 1289 и 1363 К соответственно. При увеличении нормальной силы критическая температура возрастает приблизительно линейно. Причина в том, что снижение коэффициента трения может подавить рост тепловыделения. При нормальной силе 200 Н критическая температура сплава TF550 составляет 2190 К, а сплава ТВ12 — 1459 К. Очевидно, что изменение нормальной силы оказывает большое влияние на критическое условие воспламенения. Следовательно, вибрация ротора и проскальзывание образца создают помехи и искажают значение нормальной силы во время испытаний, что приводит к изменению критического условия и может быть одной из причин низкой повторяемости испытаний.

#### 2.4. Влияние радиуса контакта на критическое условие

В ходе испытаний радиус контакта может меняться путем модификации начального наружного радиуса  $R_1$  ротора. Площадь контакта влияет на теплоотвод и тепловыделение поверхности. В теории Семенова для гетерогенной реакции тепловыделение и теплоотвод в зоне реакции одинаковы, поэтому они скомпенсированы в уравнении. Однако в рассматриваемой фрикционной модели площадь контакта влияет на напряжение трения. Рис. 5 показывает, что критическая температура уменьшается экспоненциально при увеличении радиу-

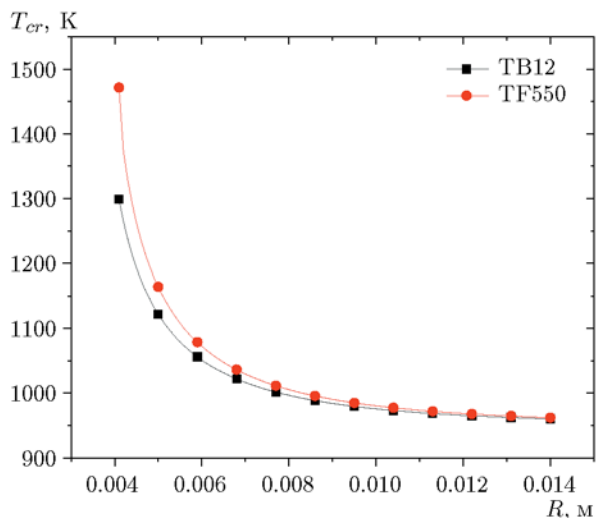


Рис. 5. Критическое условие воспламенения при различных радиусах контактной зоны

са. В случае, когда радиус контакта достигает 0.007 м, критические температуры сплавов TF550 и ТВ12 составляют 1029 и 1016 К соответственно. Затем критическая температура имеет тенденцию к стабилизации. При радиусе контакта 0.014 м критическая температура сплава TF550 равна 962 К, а сплава ТВ12 — 960 К. Можно предположить, что при радиусе меньше 0.007 м критическая температура в основном зависит от теплоты реакции, а влияние теплоотвода возрастает с увеличением радиуса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработана математическая модель устройства для испытания на трение огнестойкого титанового сплава. По сравнению с уравнением Семенова, в созданной модели нормальная сила и коэффициент трения оказывают влияние на критические условия.

Критическая температура уменьшается с увеличением концентрации кислорода. При концентрации 21 % она составляет 1369 и 1302 К для сплавов TF550 и ТВ12 соответственно. Критическая температура повышается с увеличением скорости потока. При достижении скорости потока 310 м/с критические температуры сплавов TF550 и ТВ12 возрастают до 1425 и 1354 К соответственно.

Критическая температура растет примерно линейно с увеличением нормальной силы. При нормальной силе 200 Н критические температуры сплавов TF550 и ТВ12 составляют 2190 и 1459 К соответственно. Критическая температура уменьшается экспоненциально с увеличением радиуса контактной зоны. При увеличении этого радиуса до 0.007 м критические температуры сплавов TF550 и ТВ12 составляют 1029 и 1016 К, а при радиусе 0.014 м — 962 и 960 К соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 51471155) и Национального научно-технического проекта Китая (грант № 2017-VII-00120109).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson V. G., Manty B. A. Titanium alloy ignition and combustion // Report No. 76083-30 (Naval Air Dvpt Center). — 1978. — P. 10–32.
2. Mi G. B., Huang X., Cao J. X., et al. Frictional ignition of Ti40 fireproof titanium alloys for

- aero-engine in oxygen-containing media // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. — 2013. — V. 23, N 8. — P. 2270–2275.
3. **Littman F. E., Church F. M., Kinderman E. M.** A study of metal ignitions I. The spontaneous ignition of titanium // J. Less-Common Met. — 1961. — V. 3, N 5. — P. 367–378.
  4. **Borisova E. A., Vardanov K. V.** Ignition of titanium alloys in media containing oxygen // Met. Sci. Heat. Treat. — 1963. — V. 5, N 2. — P. 98–101.
  5. **Хайкин Б. И., Блошенко В. Н., Мержанов А. Г.** О воспламенении частиц металлов // Физика горения и взрыва. — 1970. — Т. 6, № 4. — С. 474–488.
  6. **Абрамов В. Г., Гонтковская В. Т., Мержанов А. Г.** К теории теплового воспламенения. Сообщение 1. Закономерности перехода от самовоспламенения к зажиганию // Изв. АН СССР. Сер. хим. — 1966. — № 3. — С. 429–437.
  7. **Арутюнян А. Б., Харатян С. Л., Мержанов А. Г.** К теории воспламенения частиц металлов. I. Воспламенение частиц металлов при образовании твердых растворов // Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15, № 3. — С. 16–22.
  8. **Merzhanov A. G.** Thermal theory of metal particle ignition // AIAA J. — 1975. — V. 13, N 2. — P. 209–214.
  9. **Алдушин А. П., Блошенко В. Н., Сеплярский Б. С.** О воспламенении частиц металлов при логарифмическом законе окисления // Физика горения и взрыва. — 1973. — Т. 9, № 4. — С. 489–496.
  10. **Алдушин А. П., Хайкин Б. И.** К теории горения смесевых систем, образующих конденсированные продукты реакции // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 3. — P. 313–323.
  11. **Черненко Е. В., Грива В. А., Розенбанд В. И.** Исследование закономерностей воспламенения порошков титана // Физика горения и взрыва. — 1982. — Т. 18, № 5. — С. 20–26.
  12. **Evans U. R.** The mechanism of oxidation and tarnishing // Trans. ES. — 1947. — V. 91, N 1. — P. 547.
  13. **Болобов В. И.** Возможный механизм самовозгорания титановых сплавов в кислороде // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 6. — С. 77–81.
  14. **Болобов В. И.** К теории возгорания металлов при разрушении // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 6. — С. 35–40.
  15. **Болобов В. И.** Влияние условий теплообмена на критическое давление возгорания металлов в кислороде // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 54–59.
  16. **Mi G. B., Huang X., Cao J. X., et al.** Ignition resistance performance and its theoretical analysis of Ti–V–Cr type fireproof titanium alloys // Acta Metall. Sin. — 2014. — V. 50, N 5. — P. 575–586.
  17. **Mi G. B., Huang X., Cao J. X., et al.** Microstructure characteristics of burning products of Ti–V–Cr fireproof titanium alloy by frictional ignition // Acta Phys. Sin. — 2016. — V. 65, N 5. — 056103.
  18. **Mi G. B., Cao C. X., Huang X., et al.** Non-isothermal oxidation characteristic and fireproof property prediction of Ti–V–Cr type fireproof titanium alloy // J. Mater. Eng. — 2016. — V. 44, N 1. — P. 1–10.
  19. **Liang X. Y., Mi G. B., He L. J., et al.** Numerical simulation of combustion resistant titanium alloy wear behavior at high temperature fields // Mater. Sci. Forum. — 2018. — P. 168–175.
  20. **Glickstein M. R., Manty B. A., Lyon S. R., et al.** Ignition and self-sustained combustion of titanium alloys // Third DOD Conf. on Laser Effects, Vul. Coun. — 1977. — P. 19–22.

*Поступила в редакцию 16.08.2019.*

*После доработки 18.12.2019.*

*Принята к публикации 15.05.2020.*