

УДК 620.193:669.295:669.243

К МЕХАНИЗМУ ВОЗГОРАНИЯ ТИТАНА ПРИ РАЗРУШЕНИИ В КИСЛОРОДЕ

В. И. Болобов

Санкт-Петербургский горный университет, 199106 Санкт-Петербург, boloboff@mail.ru

Показано, что разогрев фрагментов разрушения стержней из технического титана ВТ1-0 и его сплавов ОТ4-1, ПТЗВ в газообразном кислороде при давлении p_{O_2} , принимаемом в экспериментах автора и других исследователей в качестве критического давления p^* , приводит только к оплавлению отдельных участков образовавшейся ювенильной поверхности, отличающихся затрудненным теплоотводом, без перехода процесса взаимодействия металла с кислородом в стадию горения. И лишь при значительно большем давлении p^{**} , которое может быть рассчитано из уравнения теплового взрыва для температуры T^* , совпадающей с температурой плавления титана, с учетом диссоциативной адсорбции молекул кислорода на поверхности расплава и коэффициента теплообмена, соответствующего случаю отвода тепла от полусферы расплава в полуограниченное твердое тело, взаимодействие металл — кислород переходит в стадию горения, в ходе которого сгорает основная масса металла.

Ключевые слова: критическое давление возгорания, кислород, титан, фрагмент разрушения, коэффициент теплоотдачи.

DOI 10.15372/FGV20170206

ВВЕДЕНИЕ

В силу доступности и высокой активности газообразный кислород широко используется в различных областях науки и техники. Например, в цветной металлургии он является одним из основных окислителей в автоклавных процессах выщелачивания цветных металлов. Для повышения скорости и более полного окисления реагентов выщелачивание проводят при повышенной температуре и максимально возможном давлении кислорода или кислородовоздушной смеси. Для интенсификации процесса насыщения пульпы кислород или его смесь с воздухом, как правило, подают под механические мешалки автоклавов. В последнее время широко внедряются автоклавно-окислительные процессы с применением кислорода в гидрометаллургии золота. Эти технологии также отличаются повышенные рабочие параметры: температура — до 503 К, давление — до 3.5 МПа [1].

Проведение автоклавных процессов с использованием высокоагрессивных и абразивных сред при повышенных температурах и давлениях выдвигает ряд требований к материалам, применяемым для изготовления автоклавной аппаратуры: наряду с высокой механической прочностью эти материалы долж-

ны обладать хорошей химической, эрозийной и термической стойкостью. Наиболее перспективными конструкционными материалами реакторного оборудования химических производств и цветной металлургии, удовлетворяющими этим требованиям, являются титан и сплавы на его основе.

Эти материалы отличаются высокой стойкостью против питтинговой коррозии, сопротивлением коррозионному растрескиванию, имеют однородный характер коррозии сварных швов. Для них характерны высокая удельная прочность, хорошие обрабатываемость и свариваемость (в среде аргона). Достаточно высокие жаропрочность и термостойкость, хорошая устойчивость против эрозии при повышенной температуре позволяют использовать титан и его сплавы в качестве материалов реакторного оборудования при температуре до 470 ÷ 520 К.

Однако при всех положительных качествах эти материалы обладают одной очень важной особенностью, препятствующей их широкому применению в автоклавных процессах с участием кислорода. Она заключается в возможности самовозгорания титана и его сплавов в кислородсодержащей среде при определенных условиях.

Случаи самовозгорания титановых клапанов и импеллеров мешалок в кислороде наблю-

дались как на стадии опытно-промышленных испытаний автоклавов, так и при освоении автоклавной технологии. В последних случаях возгорание было вызвано нарушениями технологических инструкций по эксплуатации автоклавного оборудования, причем конкретная причина возгорания в большинстве случаев не была установлена.

Большие экономические потери от самовозгорания титана и его сплавов, а также кажущаяся случайность и необъяснимость этого явления послужили причиной того, что к настоящему времени, как известно автору, лишь в одной технологии автоклавного выщелачивания с использованием кислорода (в технологии общего выщелачивания никель-кобальтовых штейнов на заводе «Оутокумпу» в Хяръявалте, Финляндия) применены незащищенные титановые автоклавы. Во всех других технологических производствах применяют автоклавы, изготовленные из высоколегированных хромоникелевых сталей и сплавов, подверженных гораздо более сильному коррозионному, абразивному и кавитационному износу по сравнению с титаном. Это существенно ограничивает срок службы оборудования, снижает его производительность и ухудшает технико-экономические показатели. В отдельных производствах используют реакторы из углеродистой стали, защищенные от контакта с агрессивной средой футеровочным слоем из кислотоупорного кирпича, что существенно уменьшает полезный объем автоклава и удорожает его изготовление.

К настоящему времени установлено [2, 3], что самовозгорание титана и его сплавов в кислороде может произойти только при разрушении металла, пусть даже в локальной точке, с появлением ювенильной (свежеобразованной) металлической поверхности. Поскольку при работе реакторов, особенно с движущимися частями, нельзя полностью исключить возможность появления такой поверхности (например, в результате трения или задира), оборудование из титана и его сплавов можно безопасно эксплуатировать в кислородсодержащей среде только при рабочих параметрах автоклавного процесса, исключающих возгорание при появлении ювенильной поверхности. Эти параметры, в свою очередь, нельзя установить без понимания механизма самовозгорания титана при разрушении и без изучения влияния различных факторов на критические параметры

процесса.

В работах [4–8] на основании анализа представленных экспериментальных данных показано, что инициатором самовозгорания титана выступают микрофрагменты разрушения, уже разогретые к моменту взаимодействия с кислородом до температуры

$$T^* = T_0 + \Delta T, \quad (1)$$

где T_0 — начальная температура, ΔT — разогрев за счет тепла, выделившегося в результате работы разрушения. При этом температура T^* , до которой способны разогреться указанные микрофрагменты, есть критический параметр, связанный с другим критическим параметром — давлением кислорода p^* (критическим давлением возгорания) уравнением теории теплового взрыва Семенова для гетерогенной реакции [9]

$$\frac{Q}{\alpha} \frac{K_0 E}{R(T^*)^2} \bar{p}^{0.5} \exp\left(-\frac{E}{RT^*}\right) = \frac{1}{e}, \quad (2)$$

где Q — удельная теплота химической реакции взаимодействия материала микрофрагмента разрушения с кислородом; α — суммарный коэффициент теплоотдачи от микрофрагмента, подвергающегося возгоранию; R — универсальная газовая постоянная; K_0 , E — предэкспонент и энергия активации в уравнении Аррениуса процесса диссоциативной адсорбции молекул кислорода на ювенильной поверхности фрагментов разрушения; $\bar{p} \equiv p^*/p_{0.1}$, $p_{0.1}$ — давление кислорода, равное 0.1 МПа.

При разработке указанной теории возгорания в работах [4–8] не анализировали, что происходит с основной массой металла конструкции после возгорания указанных фрагментов разрушения. В настоящей статье такой анализ проведен на примере технического титана VT1-0 (99.7 % Ti) и титановых сплавов OT4-1 (1.5 % Al, 0.8 % Mn) и ПТЗВ (4.0 % Al, 2.0 % V).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Из результатов исследований [4–8, 10–13], посвященных возгоранию титана при разрушении, следует, что давление кислорода, принимаемое в экспериментах за критическое давление возгорания p^* того или иного титанового сплава, соответствует значению p_{O_2} , при котором на поверхности разрушения образцов фиксируется появление оплавленных участков

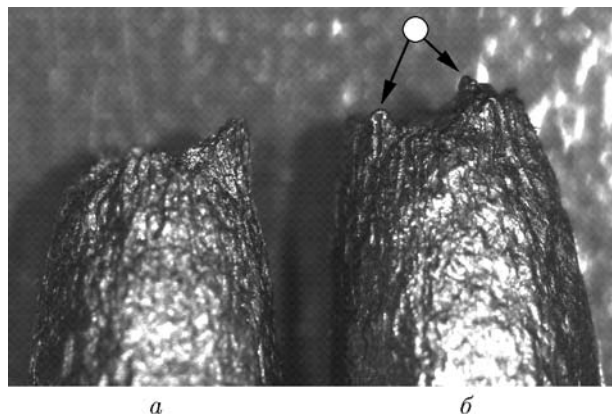


Рис. 1. Вид половинок стержня титана ВТ1-0 после разрыва в кислороде при $p_{O_2} = 2.5$ МПа ($\geq p^*$):

увеличение $\times 32$; стрелками указаны места оплавления

металла. При этом величина p^* существенно меньше давления p^{**} , при котором регистрируется сгорание всего образца. Так, например, в случае разрыва в газообразном кислороде стержней диаметром $d_0 = 5$ мм из технического титана ВТ1-0 следы оплавления на изломе фиксируются уже при $p^* = 2.3$ МПа, в то время как сгорание основной массы металла происходит только при $p^{**} = 3.5$ МПа. Такое различие давлений наблюдается и при разрыве других титановых сплавов [3].

Как можно заключить из вида разорванных титановых стержней, их разрушение протекает с образованием излома типа конуса (рис. 1, а) или чашечки (рис. 1, б).

При $p_{O_2} < p^*$ разрушение сопровождается только потемнением отдельных мест излома, что указывает на интенсивное окисление металла. При достижении давлением критического значения p^* в отдельных точках (одной или нескольких) поверхности разрушения обнаруживаются оплавленные участки в виде полусфер, окрашенных в цвета побежалости (рис. 2), что свидетельствует о разогреве титана в этих точках, как минимум, до температуры его плавления ($T_m = 1941$ К). При этом, как показывают фрактографические наблюдения, первичные следы оплавления, как правило, находятся на верхушках выступов конической (периферийной) части «чашечной» половинки излома (рис. 2, а). (О нахождении следов оплавления именно на периферийной части излома сообщается и в работе [10], где при опи-

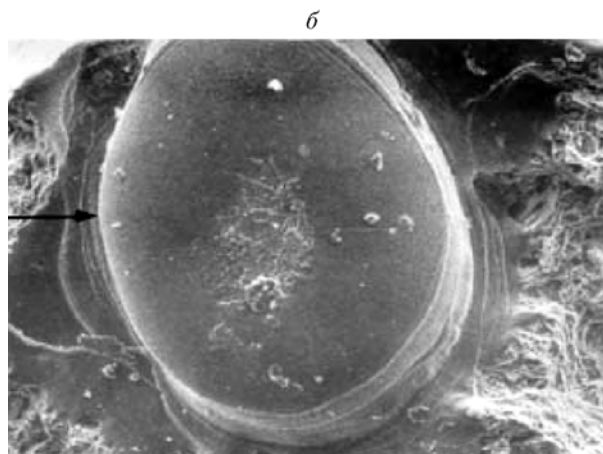
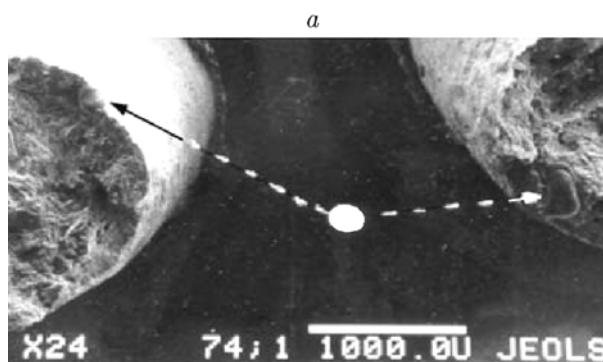


Рис. 2. Микрофрактограмма титанового сплава ОТ4-1 после разрыва стержня при $p^* < p_{O_2} = 2.0$ МПа ($< p^{**}$) (а) и вид пятна расплавленного, а затем закристаллизовавшегося металла (б):

стрелками указаны фрагменты поверхности, подвергшиеся разогреву и плавлению

сании результатов экспериментов по разрыву титановых стержней в кислороде различного давления указывается, что «иногда наблюдалось «начальное» воспламенение, т. е. на образце обнаруживались обгорелые пятна, обычно на краях образовавшейся поверхности, однако воспламенение не распространялось».)

По мере дальнейшего увеличения давления размер пятна расплавленного металла увеличивается. При $p_{O_2} = p^{**}$ одна из половинок разорванного стержня сгорает практически без остатка, в отдельных случаях сгорают обе части образца.

ПОВЕДЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ИНИЦИАТОРОВ ВОЗГОРАНИЯ ТИТАНА

Ранее [6] на основании фрактографических и металлографических наблюдений бы-

ло сделано заключение, что первичными инициаторами возгорания при разрыве титановых стержней в кислороде выступают полуотделившиеся фрагменты разрушенного объема металла в момент их нахождения в узкой, еще непрочной трещине разрушения, заполненной кислородом при рабочем давлении. Фрагменты находятся в теплообмене преимущественно с газовой средой с коэффициентом теплоотдачи $\alpha \approx 5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, практически не зависящим от теплопроводности металла (кондуктивной и радиационной составляющими теплоотвода можно пренебречь).

С учетом местонахождения оплавленных участков (см. рис. 1, 2) логично предположить, что указанные фрагменты в момент воспламенения представляли собой полуотделившиеся вершины выступов конической части поверхности разрушения, разогревшиеся за счет тепла окисления до температуры плавления титана, подвергшиеся совместно с прилегающим металлом выступу плавлению, а затем кристаллизации и последующему охлаждению. (Вывод о том, что наибольшему локальному разогреву за счет работы разрушения подвергается металл именно конической части излома, сделан и в работе [14].)

Причиной прекращения дальнейшего разогрева фрагментов после их плавления является воздействие двух факторов на тепловой баланс фрагмента: расход тепла реакции окисления на плавление металла и появление металлического контакта между расплавленным фрагментом и металлической «холодной» подложкой, что сопровождается резким возрастанием кондуктивной составляющей теплоотвода от фрагмента.

Действительно, при теплоте реакции окисления титана $Q = 28.4 \text{ МДж}/\text{кг}_{\text{O}_2}$ [7], теплоте его плавления $Q_m = 0.358 \text{ МДж}/\text{кг}_{\text{Ti}}$ [15] и предельной растворимости кислорода в титане $C^* = 14.5 \%$ (масс.) [16] доля тепла, выделившегося даже при предельном растворении кислорода в единице массы твердого титана, расходуемая на плавление этой массы, составляет

$$Q_m/(QC^*) = 8.7 \%, \quad (3)$$

а при меньшем содержании кислорода в металле это значение больше.

Влияние второго фактора проявляется еще нагляднее. Если предположить, что распределение температуры по высоте выступа h , на вершине которого находится плавящийся фраг-

мент, близко к параболической зависимости, кондуктивная составляющая суммарного коэффициента теплоотдачи от фрагмента составит

$$\alpha_\lambda = \lambda_{midl}/2h. \quad (4)$$

Здесь λ_{midl} — осредненное значение коэффициента теплопроводности титанового сплава, равное $(\lambda_{293} + \lambda_{1941})/2$, где λ_{293} — значение теплопроводности при температуре основания выступа, λ_{1941} — то же при температуре плавления металла (для титана $\lambda_{293} = 22.3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_{1941} = 33.1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [17], $\lambda_{midl} = 27.7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). При начальной высоте выступа $h_0 \approx 0.3 \text{ мм}$ (размеры выступа с оплавленной вершиной на рис. 1, б) имеем $\alpha_\lambda \approx 45 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что существенно превышает значение суммарного коэффициента теплоотдачи α от фрагмента разрушения, подвергнувшегося разогреву до температуры плавления ($\alpha \approx 5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) [6].

По мере увеличения p_{O_2} интенсивность окисления расплава кислородом возрастает, количество расплавленного металла увеличивается и зона плавления сдвигается вниз по высоте выступа. Поскольку по мере приближения фронта плавления к основанию выступа кондуктивная составляющая α_λ коэффициента теплоотдачи от расплавленного металла возрастает (4), остающаяся твердая часть выступа достигает высоты h , при которой теплоотвод q_{out} от расплавленного металла сравнивается с теплоприходом q_{in} за счет тепла химической реакции окисления (растворения кислорода в расплаве) и фронт плавления останавливается. После достижения предельной растворимости кислорода в жидком металле взаимодействие прекращается с появлением на поверхности разрушения пятна закристаллизовавшегося расплава. Таким образом, каждому значению $p_{\text{O}_2} > p^*$ соответствует свой коэффициент теплоотвода α_λ от инициатора возгорания (своей высоте остающегося выступа и диаметр пятна, расплавившегося и закристаллизовавшегося металла на рис. 2), при котором останавливается процесс плавления.

При $p_{\text{O}_2} = p^{**}$ достигается скорость взаимодействия кислорода с расплавом, при которой теплоприход к расплавленному пятну металла начинает непрерывно превышать отвод тепла в основной объем разорванного образца и стадия окисления металла переходит в стадию горения, на которой скорость реакции взаимо-

действия лимитируется скоростью диффузионных процессов.

При таком механизме процесса давлению кислорода, начиная с которого горению подвергается вся половина разорванного стержня (при $p_{O_2} \geq p^{**}$), соответствует критическое значение коэффициента теплоотвода α_λ^* , возрастающее с увеличением теплопроводности металла, а критические условия возгорания расплава описываются уравнением теплового взрыва (2) при $T^* = T_m$, $p_{O_2} = p^{**}$, $\alpha = \alpha_\lambda^*$. (Как показывают расчеты, конвективной α_α и радиационной α_ϵ составляющими суммарного коэффициента теплоотдачи от пятна расплава можно пренебречь.)

Вышесказанные предположения проверяли решением уравнения (2) относительно давления p^{**} для титановых сплавов ВТ1-0, ОТ4-1 и ПТЗВ, различающихся коэффициентами теплопроводности λ_{midl} , у которых параметр p^{**} был установлен экспериментально.

УСТАНОВЛЕНИЕ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ РАСПЛАВА

Экспериментально установленный факт увеличения диаметра расплавленного пятна на поверхности разрушения титановых стержней с ростом p_{O_2} позволяет заключить, что лимитирующей стадией взаимодействия системы расплав — кислород является процесс, скорость которого зависит от концентрации кислорода в газовой фазе. Такими процессами могут быть диффузия кислорода из объема в зону реакции или истинная химическая реакция на поверхности расплава. Как показывают проведенные расчеты, при анализируемых давлениях O_2 концентрации кислорода у поверхности расплава и в объеме газа практически совпадают. Отсюда можно сделать вывод, что лимитирующей стадией взаимодействия для расплава, как и для твердого титана с ювенильной поверхностью [5], является один из процессов на границе расплав — газ со скоростью, зависящей от концентрации газообразного реагента. Наиболее вероятный из этих процессов — химическая адсорбция кислорода на поверхности расплава.

Кроме того, в расчет принимали следующую информацию:

– расплавленный титан, как и твердый, реагирует с кислородом, образуя непрерывный ряд твердых растворов [16];

– как и в случае твердой ювенильной поверхности, взаимодействие расплава титана с кислородом сопровождается диссоциацией молекул O_2 и насыщением расплавленного металла атомами кислорода [16];

– предельная растворимость кислорода в жидком титане, как и в твердом, не зависит от давления O_2 (при $p_{O_2} > 10^{-15}$ Па) [18];

– закономерность поглощения кислорода жидкой поверхностью титана близка к той, что наблюдается для твердой поверхности, с учетом, конечно, температурного коэффициента, который в случае жидкой поверхности резко возрастает [19];

– уравнения химических превращений на поверхности твердых металлов могут быть формально использованы для оценки скорости превращений на поверхности металлических расплавов [18];

– как показано в [3], кинетические параметры K_0 , E , входящие в уравнение (2) для титана, определены из значений критических параметров T^* , p^* для всех произвольно взятых титановых сплавов и являются, следовательно, для всех них общими.

С учетом вышесказанного процесс взаимодействия кислорода с жидкими титаном и его сплавами может быть описан тем же кинетическим уравнением, что и взаимодействие кислорода с ювенильной поверхностью твердого титана.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В качестве критического коэффициента теплоотвода α_λ^* (110 кВт/(м²·К) для ВТ1-0; 95 кВт/(м²·К) для ОТ4-1; 72 кВт/(м²·К) для ПТЗВ), при котором горению подвергается вся половинка разорванного стержня, принимали коэффициент теплоотвода от пятна расплава в основной объем половинки стержня в виде, соответствующем переносу тепла теплопроводностью в полуограниченном твердом теле при стационарном режиме [20]:

$$\alpha_\lambda^* = \lambda_{midl}/r, \quad (5)$$

где $r = d_s/2 = 0.25$ мм; $\lambda_{midl} = 27.7$ Вт/(м·К) для ВТ1-0, 23.8 Вт/(м·К) для ОТ4-1, 18.0 Вт/(м·К) для ПТЗВ [21–23]. При этом пятно расплава считалось полусферой диаметром $d_s = 0.5$ мм, равным ширине основания конической части излома (см. рис. 1).

Значения p^{**} для возгорания пятна расплавленных титановых сплавов, находящегося в теплообмене с «холодной» половинкой стержня, после подстановки постоянных ($K_0 = 8.3 \text{ кг}_{\text{O}_2}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $E = 44.5 \text{ кДж/моль}$ [6], $Q = 28.4 \text{ МДж/кг}_{\text{O}_2}$ [7], $T^* = T_m = 1941 \text{ К}$) в уравнение теплового взрыва (2) вычисляли из равенства

$$(p^{**})^{0.5} = 0.172 \cdot 10^{-4} \alpha_{\lambda}^*. \quad (6)$$

Расчетные значения p^{**} равны: 3.6 МПа для титана (экспериментальное значение 3.50 МПа), 2.7 МПа для сплава ОТ4-1 (2.5 МПа) и 1.3 МПа для сплава ПТЗВ (1.2 МПа).

Близость значений p^{**} , установленных экспериментально и рассчитанных из уравнений теплообмена (5) и критических условий теплового взрыва (2) с использованием кинетики окисления (а не горения) металла (6), может служить подтверждением справедливости принятых при расчетах допущений и вывода, что в пятнах закристаллизовавшегося расплава, обнаруживаемых при $p^* \leq p_{\text{O}_2} < p^{**}$ на поверхности разрушения титановых сплавов, металл еще не подвергался горению.

Таким образом, возгорание титановых сплавов при разрушении стержней в кислороде протекает в две стадии:

- при $p^{**} \geq p_{\text{O}_2} > p^*$, где p^* не зависит от теплопроводности материала, саморазогрев фрагментов разрушения за счет тепла химической реакции окисления приводит только к оплавлению небольшой, отличающейся затрудненным теплоотводом части ювенильной поверхности металла, после чего реакция прекращается;
- при $p_{\text{O}_2} \geq p^{**}$, где p^{**} возрастает с увеличением теплопроводности сплава, образовавшийся расплав подвергается дальнейшему саморазогреву с переходом реакции окисления в стадию горения, в результате чего сгорает основная масса стержня.

Сравнивая предложенный выше механизм возгорания титана при разрушении стержней в кислороде с моделями возгорания, описанными в литературе, необходимо отметить, что согласно [24] воспламенение титана в кислороде отнесено к модели воспламенения, не связанного с температурой фазового перехода и контролируемого взаимной растворимостью фаз. При этом приведенные там экспериментальные значения температуры воспламенения титана $T_{ign} = 673 \div 1373 \text{ К}$ существенно ниже тем-

пературы плавления этого металла. Расхождение модели [24] с предложенной моделью двухстадийного воспламенения монолитного титана при разрушении объясняется следующим.

Представленные в [24] значения T_{ign} относятся к воспламенению частиц титана в условиях весьма ограниченного теплоотвода (насыпка частиц на ложном дне стеклянной трубки, куда подается кислород той же температуры, что и насыпка). Такого же уровня значения T^* (682 ÷ 770 К) установлены и в наших работах [4–6], в которых условия возгорания фрагментов разрушения титана также отличаются затрудненным теплоотводом. Но если в условиях [24] плавление частиц не отражается заметно на интенсивности теплоотвода и саморазогрев фрагментов продолжается с переходом взаимодействия с кислородом в стадию горения, то в случае разрушения стержня разогревающиеся фрагменты после плавления приходят в соприкосновение с «холодным» монолитным металлом, в результате чего теплоотвод резко возрастает и разогрев расплава прекращается.

ВЫВОДЫ

На примере технического титана ВТ1-0 и его сплавов ОТ4-1, ПТЗВ показано, что давление кислорода, принимаемое в экспериментах автора и других исследователей в качестве критического давления возгорания металла p^* при разрушении, соответствует давлению, при котором саморазогрев образующихся при разрушении фрагментов приводит только к оплавлению отдельных, отличающихся затрудненным теплоотводом участков образовавшейся ювенильной поверхности без их горения. И лишь при существенно большем давлении кислорода p^{**} , значение которого можно рассчитать из уравнения теплового взрыва при критической температуре T^* , совпадающей с температурой плавления материала, и коэффициенте теплоотдачи, соответствующем отводу тепла от полусферы в полуограниченное твердое тело, взаимодействие металл — кислород переходит в стадию горения.

Данный вывод имеет практическое значение для определения давления безопасной эксплуатации титановых конструкций в кислородсодержащих средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Набойченко С. С., Ни Л. П., Шнеерсон Я. М.** Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. — Екатеринбург: ГОУ УГТУ — УПИ, 2002.
2. **Болобов В. И.** Проблема самовозгорания титана в кислороде и возможные пути ее решения // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., 20–21 июня 2013 г. — С. 1083–1094.
3. **Болобов В. И.** Безопасность применения титана в автоклавных процессах цветной металлургии с применением газообразного кислорода. — СПб.: Изд-во «Лань», 2015.
4. **Болобов В. И.** К механизму самовозгорания титановых сплавов в кислороде // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 6. — С. 37–45.
5. **Болобов В. И.** Возможный механизм самовозгорания титановых сплавов в кислороде // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 6. — С. 77–81.
6. **Болобов В. И., Подлевских Н. А.** Механизм возгорания металлов при разрушении // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 4. — С. 39–48.
7. **Болобов В. И.** К теории возгорания металлов при разрушении // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 6. — С. 35–40.
8. **Болобов В. И.** Влияние условий теплообмена на критическое давление возгорания металлов в кислороде // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 54–59.
9. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
10. **Littman F. E., Church F. M., Kinderman E. M.** A study of metal ignitions. The spontaneous ignition of titanium // J. Less-Common Metals. — 1961. — V. 3. — P. 367–378.
11. **Борисова Е. А., Барданов К. В.** О загорании титановых сплавов в кислородсодержащих средах // Цв. металлургия. — 1963. — № 2. — С. 47–48.
12. **Дерябина В. И., Колгатин Н. Н., Лукьянов О. П. и др.** Возгорание низколегированного титанового α -сплава при разрыве в кислородсодержащих газах // Физ.-хим. механика материалов. — 1971. — № 1. — С. 16–19.
13. **Николаева С. А., Зашихина Т. Н.** О загорании титана при повышенных давлениях кислорода // Цв. металлы. — 1964. — № 1. — С. 54–55.
14. **Бернштейн М. Л., Займовский В. А.** Механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1969.
15. **Таблицы физических величин: справочник /** под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
16. **Пульцин Н. М.** Взаимодействие титана с газами. — М.: Металлургия, 1969.
17. **Зиновьев В. Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. — М.: Металлургия, 1985.
18. **Фромм Е., Гебхардт Е.** Газы и углерод в металлах. — М.: Металлургия, 1980.
19. **Титан и его сплавы. Т. 1: Технически чистый титан /** под ред. Л. С. Мороза. — Л.: Судпромгиз, 1960.
20. **Уонг Х.** Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. — М.: Атомиздат, 1979.
21. **Теплофизические свойства титана и его сплавов: справочник /** под ред. А. Е. Шнейншлина. — М.: Металлургия, 1985.
22. **Сплавы титана с особыми свойствами: сборник /** под ред. Ю. К. Ковнеристого. — М.: Наука, 1982.
23. **Лариков Л. Н., Юрченко Ю. Ф.** Структура и свойства металлов и сплавов. Тепловые свойства металлов и сплавов: справочник. — Киев: Навук. думка, 1985.
24. **Брейтер А. И., Мальцев В. М., Попов Е. И.** Модели воспламенения металлов // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 4. — С. 558–570.

Поступила в редакцию 24/V 2016 г.