

## ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ПОТОКЕ КИСЛОРОДА

В. И. Болобов

РНЦ «Прикладная химия», 197198 Санкт-Петербург

На основании экспериментальных данных предложен механизм, объясняющий самопроизвольное воспламенение металлов (титан, цирконий, их сплавы) при обдуве образцов звуковым потоком кислорода повышенного давления при комнатной температуре. Он основан на заключении о возможности разрушения оксидной пленки и поверхностного слоя металлических конструкционных материалов газовым потоком. Разрушению способствует резкое охлаждение в момент обдува.

В работе [1] представлены экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности самопроизвольного воспламенения титановых сплавов при обдуве образцов потоком газообразного кислорода. В настоящем исследовании на основании результатов дополнительных экспериментов предложен возможный механизм процесса.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом испытаний служили образцы титана (99%), титановых сплавов (ВТ6, ВТ14), циркония (99%), никеля (НП2), меди (М-1), алюминия (АДОМ), ниобия (99%), магния (99,9%), углеродистой и нержавеющей сталей (Ст.3, 12Х18Н10Т) в виде пластин с размерами 13 × 30 × 2 мм с поверхностью после проката или фрезеровки, а также титановые пластины с покрытиями:

- из никеля и меди, нанесенных гальваническим способом;
- из окислов титана, полученных при окислении образцов в воздушной среде при  $T = 1073 \text{ K}$  ( $t = 24 \text{ ч}$ );
- из синтетических эмалей МЛ-12, МЛ-167 после сушки при 400 К;
- из фторопласта ФЗМС после оплавления при 540 К.

Испытания проводили на установке (рис. 1), описанной в [1] и дополненной фильтром 1 очистки газа с размером ячейки 20 мкм; поворотным устройством 11, обеспечивающим установку образца под заданным углом атаки  $\alpha$  к направлению потока; вольтметром 4 для замера зарядов статического электричества со шкалой 0 ÷ 2,5 кВ; вентилем 7, обеспечивающим скачкообразное или плавное повышение давления в потоке у поверхности образца.

После резкого открытия вентиля широкая сторона образца в течение 1 ÷ 3 с подвергалась обдуву потоком кислорода ( $\alpha = 0 \div 90^\circ$ ), истекающим с критической скоростью ( $\approx 340 \text{ м/с}$ ) из емкости с начальным давлением  $p_0$  через отверстие насадка. Процесс обдува и возгорания фиксировался кинокамерой «Конвас» (25 кадров/с). Место воздействия газового потока на поверхность образца исследовалось микроскопическим методом и измерением микротвердости с использованием микроскопа «VERSAMET-2» и микротвердомера «MECROMET-2».

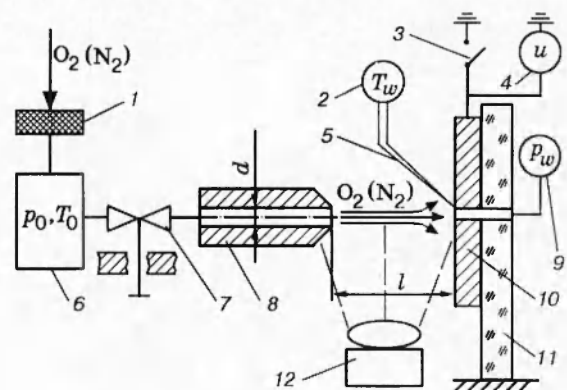


Рис. 1. Принципиальная схема установки для изучения условий воспламенения металлов в потоке кислорода:

1 — фильтр; 2 — электродатчик температуры; 3 — выключатель; 4 — статический вольтметр; 5 — термопара (хромель-копель); 6 — емкость ( $V \approx 0,5 \text{ л}$ ); 7 — вентиль; 8 — насадка; 9 — датчик давления; 10 — испытуемый образец; 11 — держатель и поворотное устройство; 12 — кинокамера

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ОБДУВА И ВОЗГОРАНИЯ

Как было обнаружено ранее [1], при достаточно высоком давлении кислорода в емкости лобовой обдув ( $\alpha = 90^\circ$ ) образцов титана и его сплавов потоком кислорода вызывает их возгорание. Условиям воспламенения соответствует определенное для каждого сплава критическое значение давления газа у поверхности образца.

В ходе настоящих исследований удалось установить, что самовозгоранию в условиях эксперимента из испытанных металлов подвержены и цирконий, а воспламенение образцов Ti и Zr происходит и при других значениях  $\alpha \neq 90^\circ$ . На поверхности образцов Ti и Zr, не воспламенившихся при обдуве, обнаружены потухшие очаги возгорания с блестящим металлом внутри.

Ниже представлены минимальные значения давления кислорода в емкости ( $p_0^*$ ), при которых возможно возгорание титана и циркония (для  $\alpha = 90^\circ$ ,  $l = 2$  мм,  $d = 2$  мм), а также соответствующие им значения полного давления у поверхности образца ( $p_w^*$ ), рассчитанные в [1]. Для сопоставления приведены значения критического давления возгорания ( $p^*$ ) материалов, установленные в [2, 3] при разрыве стержней без обдува:

| Металл   | $p_0^*$ , МПа | $p_w^*$ , МПа | $p^*$ , МПа          |
|----------|---------------|---------------|----------------------|
| Титан    | 20            | 6,2           | 2,3 [2]; 2 ÷ 2,5 [3] |
| Цирконий | 32            | 8,3           | 2,1 [2]              |

Другая характерная особенность обдува образцов титановых сплавов, циркония, ниобия и нержавеющей стали при всех углах атаки — свечение в потоке перед образцом при  $p_0 \ll p_0^*$  (для титана, например, при  $p_0 \geq 0,5$  МПа). При малом удалении образца от насадки ( $l \leq 10$  мм) оно напоминает электрический коронный разряд или вспышку (рис. 2); при большем (до 60 мм) удалении фиксируются вспыхивающие точки или искры, разлетающиеся от поверхности образца. Причем появление свечения в потоке практически не сказывается на температуре образца.

На поверхности образцов всех материалов после их обдува потоком кислорода, включая и те, для которых свечение в потоке отсутствует, обнаруживается пятно (см. рис. 1, а в [1]), по конфигурации и цвету напоминающее след от электрического разряда на электроде автомобильной свечи.

Результаты испытаний титановых образцов с нанесенными на них покрытиями пред-

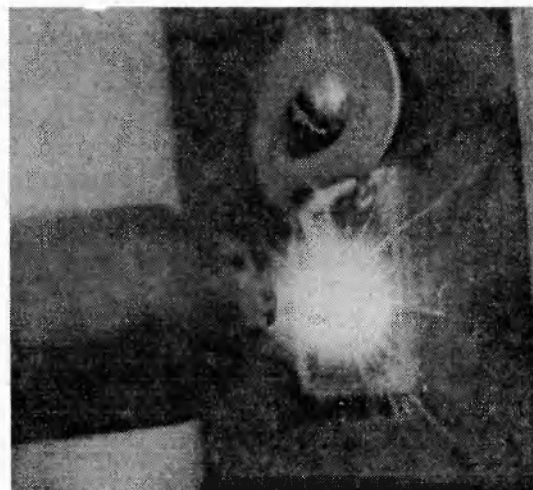


Рис. 2. Характерный вид свечения, наблюдаемого при обдуве образцов потоком кислорода (титан,  $p_0 = 60$  МПа,  $d = 2$  мм,  $l = 10$  мм)

ставлены в таблице. Видно, что металлические покрытия, а также оксидная пленка, образующаяся при высокотемпературном окислении титана, в результате воздействия газового потока подвергаются отслоению и не защищают металлическую подложку от возгорания (за исключением никеля, оболочка которого и после отслоения продолжает сохранять геометрическую форму образца). В то же время наличие на поверхности титана слоя эмалей или фторопласта достаточной толщины препятствует ее возгоранию в потоке кислорода.

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ГИПОТЕЗ О ПРИЧИНАХ ВОЗГОРАНИЯ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

В монографии [4] приведены результаты экспериментов, в которых наблюдалось возгорание предварительно нагретых до температуры 588 К стержней (титан, магний, сплавы железа) при их обдуве сверхзвуковым воздушным потоком с числом Маха  $M = 1,4 \div 2,0$ . В [4] возгорание материалов объясняется догревом их до температуры воспламенения вследствие превращения кинетической энергии потока в тепловую. С нагревом образцов за счет увеличения температуры в волне сжатия связывают [5] и воспламенение фольг из титана и нержавеющей стали при воздействии на них ударной волны.

В этой связи для выяснения причины воспламенения металлов в настоящих эксперимен-

Влияние покрытий на стойкость титана к возгоранию в потоке кислорода  
( $\alpha = 90^\circ$ ,  $l = 2$  мм,  $d = 2$  мм,  $T_0 = 300$  К)

| Материал покрытия | $h$ , мкм | $p_0$ , МПа | $N$ | Результат испытаний       | Состояние покрытия после испытаний   |
|-------------------|-----------|-------------|-----|---------------------------|--------------------------------------|
| Никель            | 50        | 60          | 6   | Нет возгорания и свечения | Вздутие по большей части поверхности |
| Медь              | 5         | 20          | 2   | То же                     | Отслоение                            |
|                   |           | 40          | 1   | Возгорание                | Сгорание вместе с подложкой          |
| Окислы титана     | 10        | 15          | 1   | Нет возгорания            | Отслоение                            |
|                   |           | 20          | 1   | Возгорание                | Сгорание вместе с подложкой          |
| Эмаль МЛ-12       | 100       | 60          | 5   | Нет возгорания и свечения | Без изменений                        |
| Эмаль МЛ-167      | 100       | 60          | 5   | То же                     | То же                                |
| Фторопласт ФЗМС   | 2         | 40          | 1   | Свечение потока           | Разрушение в месте воздействия       |
|                   | 10        | 40          | 3   | То же                     | То же                                |
|                   | 50        | 40 ÷ 70     | 11  | Нет возгорания и свечения | Без изменений                        |

Примечание.  $h$  — толщина покрытия;  $N$  — количество пусков.

тах в первую очередь надо было проанализировать изменение температуры образца  $T_w$  и полного давления  $p_w$  у его поверхности при обдуве потоком кислорода. Такие эксперименты были проведены на образцах с отверстием (диаметром 1 мм) и спаям термопары в месте воз-

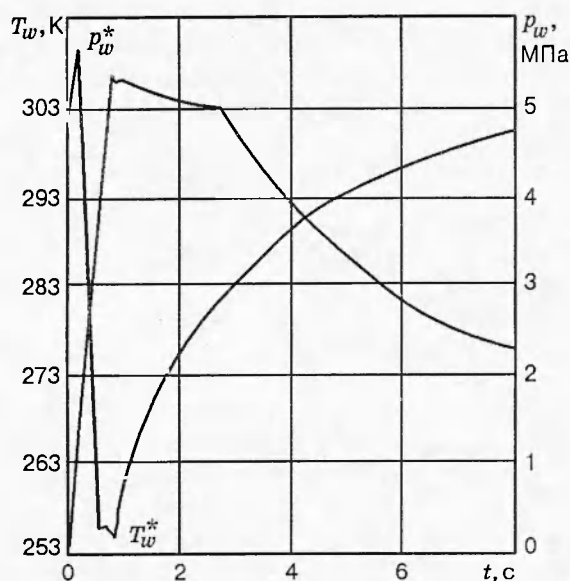


Рис. 3. Изменение параметров  $p_w$ ,  $T_w$  во времени при обдуве образца титанового сплава ВТ14 потоком кислорода ( $p_0 = 20$  МПа,  $l = 2$  мм,  $d = 2$  мм)

действия потока. Типичный вид зависимостей  $T_w(t)$  и  $p_w(t)$  представлен на рис. 3. Видно, что после резкого открытия вентиля полное давление газа у поверхности образца  $p_w$  скачком возрастает до максимального значения (изменяющегося с величиной  $p_0$  по уравнению (1) из [1]), после чего убывает. При этом значения  $T_w$  вначале незначительно возрастают (вероятно, за счет сжатия воздуха, находящегося между насадкой и образцом), далее вследствие дроссельного эффекта существенно понижаются, после чего по мере уменьшения интенсивности обдува постепенно возвращаются к исходному уровню ( $\approx 300$  К).

Естественно заключить, что столь малое повышение температуры поверхности в начальный момент обдува не может быть причиной ее воспламенения, и версия [4, 5] о разогреве образцов за счет энергии потока не объясняет самопроизвольного возгорания в настоящих экспериментах. Нельзя объяснить разогревом за счет кинетической энергии потока и наблюдавшееся воспламенение насадка, изготовленного из титана, при пропускании через него кислорода высокого давления ( $p_0 = 50$  МПа).

Другая точка зрения, изложенная в работе [1], основана на подобию характера свечения коронному разряду. Было высказано предположение, что возгорание металлов в этом случае инициируют возникающие в потоке заряды статического электричества при их разряде на образец. В настоящей работе измерялась

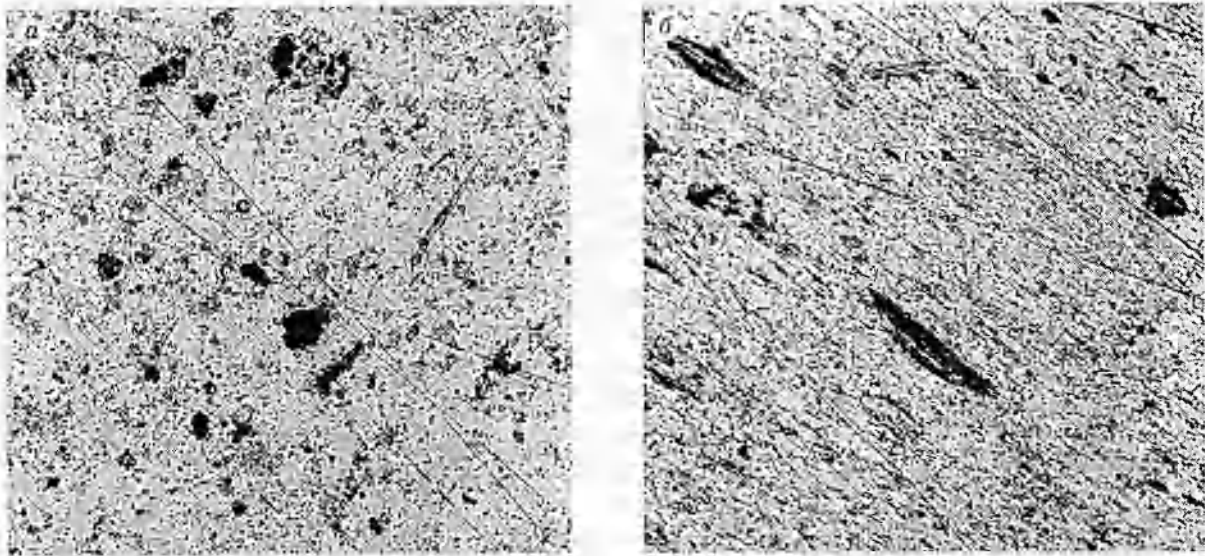


Рис. 4. Микрофотографии поверхности титанового сплава после обдува потоком кислорода ( $\times 200$ ):

$p_0 = 40$  МПа,  $d = 2$  мм; а —  $\alpha = 90^\circ$  ( $l = 5$  мм); б —  $\alpha \approx 5^\circ$

разность потенциалов между землей и изолированным образцом или насадком, изготовленными из различных металлических материалов (титан, медь, нержавеющая сталь). Оказалось, что вне зависимости от материала образца и насадки, а также от параметров обдува ( $\alpha = 0 \div 90^\circ$ ,  $p_0 \leq 70$  МПа,  $l = 2 \div 30$  мм,  $d = 1 \div 3$  мм) в системе не возникает электрических потенциалов заметной величины. Отсюда можно заключить, что регистрируемое в экспериментах свечение имеет другую, отличную от электрической природу. Отметим, что характерное пятно на образцах материалов в месте воздействия потока появляется и при отсутствии свечения в потоке [1] (например, при обдуве образцов меди, алюминия, никеля, углеродистой стали, магния).

Третья гипотеза, представлявшаяся ранее [1] автору маловероятной, была высказана в качестве одной из альтернативных в работе [2] для объяснения воспламенения циркониевых образцов при их быстром контактировании с кислородом повышенного давления. Один из наиболее интересных результатов данной работы состоит в том, что удалось обнаружить относительную независимость величины критического давления возгорания металла от наличия защитной окисной пленки на его поверхности. Авторы [2] предположили, что возникающая в условиях экспериментов ударная волна

вызывает механическое повреждение сплошного окисного слоя циркония (царапины, отслаивания и т. п.), затем следует быстрое окисление уже незащищенной поверхности металла.

Информация о том, что и в нашем случае воспламенение связано с механическим разрушением окисной пленки потоком, была получена в результате металлографических исследований поверхности образцов после обдува. Исследовались полированные пластины титана, меди, алюминия после пятикратного обдува (по 2 с) потоком кислорода или азота, истекающего через насадок из емкости ( $p_0 = 40$  МПа,  $T_0 = 300$  К) по нормали к поверхности ( $l = 5$  мм,  $d = 2$  мм) или по касательной ( $\alpha = 0 \div 5^\circ$ ). Предварительно было установлено, что состояние поверхности материалов слабо влияет на закономерности процессов обдува и возгорания образцов. Эксперименты проводили как при резком, так и при плавном открытии вентиля. Анализировались состояние материалов в месте и вне места воздействия потока и их микротвердость. Измерение микротвердости проводили как на поверхности образцов, так и по их толщине; в последнем случае использовали поперечные шлифы.

В результате микроскопических наблюдений выяснилось, что обнаруживаемое на поверхности металлов характерное пятно (из [1]) образуется в результате обдува образцов как

кислородом, так и азотом высокого давления и представляет собой, вне зависимости от скорости открытия вентиля, совокупность микрократеров в металле глубиной до 20 мкм, форма которых различается в зависимости от угла атаки потока ( $\alpha$ ):

- при обдуве по нормали к поверхности это «оспины» размером до 50 мкм (рис. 4,а);
- при малых углах атаки ( $\alpha \cong 0 \div 5^\circ$ ) — «канавки» длиной до 250 мкм, параллельные направлению потока (рис. 4,б).

Наряду с образованием вышеуказанных микрократеров действие газового потока приводит к заметному увеличению микротвердости поверхностного слоя материала ( $HV$ ), что свидетельствует о его пластической деформации. Рис. 5 иллюстрирует изменение  $HV$  по толщине образца меди и алюминия вне зоны воздействия и под микрократерами, образовавшимися после обдува образцов кислородом и азотом. Видно, что для зоны разрушения вне зависимости от свойств газовой среды величина  $HV$  материалов по мере приближения к поверхности возрастает: для меди на 32%, для алюминия на 18%. Толщина поверхностного слоя с повышенной микротвердостью (глубина проникновения пластической деформации) для указанных металлов составляет  $\cong 100$  и 60 мкм соответственно. Для титана, обладающего значительно более высокими прочност-

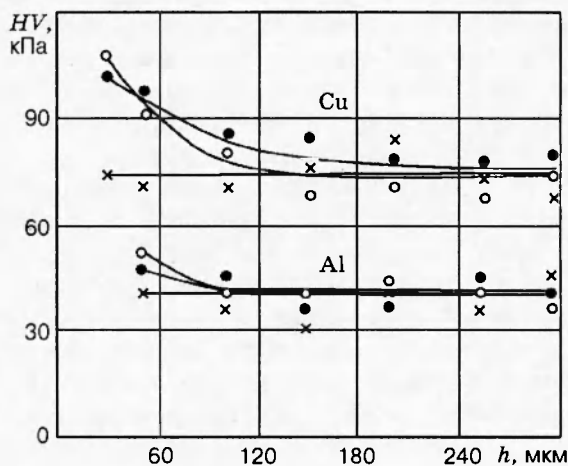


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине образца после воздействия газовым потоком:

$p_0 = 40$  МПа,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $l = 5$  мм,  $d = 2$  мм, 5 пусков по 2 с; x — вне зоны обдува; o — под микрократером после обдува кислородом; • — под микрократером после обдува азотом

ными характеристиками, возможное повышение микротвердости поверхностного слоя сопоставимо с погрешностью измерения  $HV$  ( $\cong 270 \pm 10$  кПа при нагрузке  $m = 25$  г).

При измерении микротвердости меди, подвергшейся обдуву потоком кислорода при малых углах атаки, оказалось, что и в этом случае материал в поверхностном слое образца также подвергается значительной пластической деформации, о чем свидетельствует повышение значений  $HV$  в зоне обдува с 75 до 100 кПа ( $m = 10$  г).

Вышеуказанное воздействие на поверхность нельзя объяснить случайно попадающими в поток мелкими частицами повышенной твердости (например, частицами материалов арматуры, трубопроводов, их окислов и пр.), поскольку в системе подачи газа имеется фильтр тонкой очистки, а вся установка специально готовится для работы с кислородом.

Что касается возможности разрушения образцов под воздействием капелек влаги, образующихся при дросселировании газа из паров, содержащихся в виде примеси в кислороде, то, как показывают результаты расчета [6], величина «инкубационного» периода, необходимого для появления начальных следов гидроэрозии поверхности анализируемых материалов ( $t_i \cong 10$  мин  $\div$  10 ч), на несколько порядков превышает время, за которое образцы подвергаются заметному разрушению в настоящих экспериментах ( $t < 10$  с). Об отсутствии влияния влаги свидетельствует и то обстоятельство, что интенсивность разрушения поверхности образцов в потоке не зависит от содержания паров воды в исходном кислороде (в пределах  $0,015 \div 0,52$  г/м<sup>3</sup> при  $p = 0,1$  МПа).

### ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Схему поведения металлов в условиях проведения экспериментов можно представить в следующем виде.

С момента начала обдува вследствие высоких скоростей и возрастающего динамического напора газового потока в оксидной пленке и металле обдуваемого образца возникают значительные нормальные или срезающие напряжения (в зависимости от угла атаки  $\alpha$ ), которые за короткое время приводят к пластической деформации материала в поверхностном слое и к локальному разрушению окисла и подложки в наиболее ослабленных местах. При этом указанное воздействие потока проявляет-

ся как при сравнительно медленном, так и при быстром росте напряжений в материале. Разрушение проявляется в вырывании частиц металла с образованием на поверхности участков (микроратеров), свободных от оксидной пленки. Доминирующее воздействие тех или иных напряжений определяет вид образующихся микроратеров: «оспины» или «канавки». При этом характер и интенсивность разрушения практически одинаковы при обдуве образцов кислородом и азотом.

Говоря об эрозии металлов под действием создаваемых потоком напряжений, следует отметить, что значения  $p_w \cong 0,2 \div 20$  МПа, регистрируемые в экспериментах, значительно уступают табличным значениям пределов текучести и прочности анализируемых материалов ( $\cong 30 \div 70$  МПа для Al и Cu;  $\geq 300$  МПа для Ti). Это противоречие можно объяснить как спецификой замера давления  $p_w$ , когда датчиком давления измеряется усредненная величина усилия, так и тем обстоятельством, что значения  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ , где  $\sigma_{0,2}$  — предел текучести при остаточной деформации 0,2%,  $\sigma_b$  — временное сопротивление разрыву, характеризуют статистически усредненные прочностные свойства поликристаллических образцов, установленные при их растяжении. В данном же случае, аналогично кавитационному разрушению [7], играют роль механические свойства отдельных структурных составляющих (микрообъемов) в условиях сжимающих и срезающих напряжений.

Можно предположить, что разрушению оксидной пленки на металлических образцах способствует и их резкое охлаждение (на  $40 \div 80$  К) в начальный момент обдува. Вследствие существенной разницы в коэффициентах расширения металлов и оксидов резкое изменение температуры вызывает появление на их границе напряжений, что приводит к отслаиванию оксидной пленки на поверхности ее раздела с металлом [4]. Этого не происходит в случае нанесения на металл слоя органических покрытий (эмалей, фторопласта и пр.), отличающихся значительными пластическими свойствами. Деформируясь без разрушения, пленки из указанных материалов предохраняют металл от контакта со средой.

В случае таких материалов, как медь, никель, алюминий, магний, углеродистая сталь, действие потока кислорода, так же как и азота, проявляется только в разрушении поверхностного слоя пластины. Вырванные и уноси-

мые потоком частицы, как и участки образца с ювенильной поверхностью, в кислороде не воспламеняются при  $p_0 \leq 70$  МПа,  $T_0 = 300$  К.

При обдуве титана и его сплавов, циркония, ниобия, нержавеющей стали частицы металла спонтанно воспламеняются и мгновенно сгорают в кислороде. Свечение, сопровождающее горение частиц указанных материалов, появляется при сравнительно низких давлениях кислорода (например, при  $p_0 \geq 0,5$  МПа для титана). Это свидетельствует о том, что уже при столь малых начальных давлениях газа эрозия материалов в кислородном потоке протекает с заметной скоростью.

В случае достаточно больших давлений кислорода у поверхности образца ( $p_w \geq 3$  МПа) наряду с частицами воспламеняется и сама металлическая поверхность титана, циркония и их сплавов. При этом при  $p_w < p_w^*$  воспламеняется только ювенильная поверхность микроратеров, без распространения пламени на весь образец. При  $p_w \geq p_w^*$  воспламеняется весь участок образца, подвергаемый обдуву. Можно предположить, что при ужесточении условий воздействия (повышение температуры и давления в потоке) будут воспламеняться и сами образцы материалов (нержавеющая сталь, ниобий), для которых в условиях настоящих экспериментов воспламенялись только частицы. Для нержавеющей стали такой вывод не противоречит заключению [8] о существенном снижении температуры воспламенения компактных образцов с ювенильной поверхностью при увеличении давления кислорода.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенное объяснение причины возгорания металлов в потоке кислорода основано на заключении о возможности разрушения газовым потоком оксидной пленки и поверхностного слоя металлических конструктивных материалов при  $M = 1$ ,  $p_w \geq 0,5$  МПа и температуре, близкой к комнатной. (Природа газа заметной роли не играет.) Из этого заключения вытекает, что при эксплуатации газового оборудования, когда образуются высокоскоростные газовые потоки (при срабатывании клапанных устройств, резком открытии вентилей, прорывах мембран и пр.), металлические конструктивные элементы изделий, контактирующие с потоком, могут подвергаться заметной эрозии с образованием ювенильной поверхности металла. Если используемая газовая среда агрессивна (например, кислород, продук-

ты сгорания топлив при избытке окислителя, фтор, хлор, окислы азота и др.), а давление газа у поверхности металла достаточно велико, не исключена возможность возгорания образовавшейся ювенильной поверхности и распространения горения на всю конструкцию. При этом можно предположить, что при повышении температуры возрастает вероятность воспламенения.

При анализе литературы не удалось найти подтверждения указанного заключения о возможности заметного разрушения металлических конструкционных материалов в газовых потоках при нормальной температуре. Найденная информация в своем большинстве (например, [4–7, 9–13]) относится или к области эрозионного разрушения металлов при наличии в потоке твердых (жидких) частиц, или же к результатам испытаний, проводимых при высоких температурах. В последнем случае, как правило [10], внимание акцентируется на доминирующей роли термического фактора. (Автор работы [4] вообще считает маловероятным, что кинетической энергии потока достаточно для разрушения окисной пленки, пока она остается в твердом состоянии.) Вследствие практической важности обеспечения безопасной эксплуатации оборудования, работающего с агрессивными газовыми средами, данное заключение автора требует проверки.

### ВЫВОДЫ

Установлено, что наряду с титановыми сплавами [1] в потоке кислорода воспламеняются и компактные образцы циркония; значения критического давления возгорания материалов превышают значения, установленные при разрыве стержней в условиях естественной конвекции. Возгорание материалов может иметь место при различных углах атаки потока.

Показано, что свечение, наблюдаемое при обдуве ряда металлических материалов потоком кислорода, обусловлено воспламенением частиц, вырывааемых из металлической поверхности. Материал поверхностного слоя образцов, обдуваемый газовым потоком кислорода или азота, подвергается пластической деформации и разрушению с образованием микрократеров.

Предложен механизм процесса воспламенения металлов в высокоскоростном потоке

агрессивной газовой среды. Он основан на заключении о возможности разрушения оксидной пленки и поверхностного слоя металлических конструкционных материалов газовым потоком повышенного давления при комнатной температуре.

Автор выражает благодарность руководителю группы металлографического анализа А. И. Маннинену и другим сотрудникам РНЦ «Прикладная химия», оказавшим помощь в проведении данной работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Болобов В. И. Возгорание титана в потоке кислорода // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 12–15.
2. Littman F. E., Church F. M., Kinderman E. M. A study of metal ignitions // J. Less-Common Met. 1961. N 3. P. 367–397.
3. Борисова Е. А., Борданов К. В. О загорании титановых сплавов в кислородсодержащих средах // Цв. металлургия. 1963. № 2. С. 47–48.
4. Бенар Ж. Окисление металлов. М.: Металлургия, 1968. Т. 1.
5. Иванов Б. А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. М.: Химия, 1974.
6. Спинжер Дж. С. Эрозия при воздействии капель жидкости. М.: Машиностроение, 1981.
7. Гликман Л. А. Коррозионно-механическая прочность металлов. М.; Л.: Машгиз, 1955.
8. Болобов В. И., Березин А. Ю., Дрожжин П. Ф., Штейнберг А. С. Воспламенение компактных образцов нержавеющей стали в кислороде высокого давления // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 3. С. 3–7.
9. Шрейдер А. В. Эрозионный износ металлов и защита покрытиями // Физика металлов и металлосодержание. 1956. Т. 2, № 1. С. 181–188.
10. Урванцев Л. А. Эрозия и защита металлов. М.: Машиностроение, 1966.
11. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов. М.: Машиностроение, 1977.
12. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоиздат, 1987.
13. Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982.

Поступила в редакцию 21/V 1996 г.,  
в окончательном варианте — 26/VIII 1996 г.