

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И СИЛОВЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

М. П. Бондарь, Е. С. Ободовский*, В. Н. Рычков**, М. Е. Топчиян

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

*Конструкторско-технологический институт гидроимпульсной техники СО РАН, 630090 Новосибирск

**Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

В современных аэродинамических установках, работающих при высоких давлениях (до 1 ГПа), область вблизи критического сечения сопла находится в наиболее тяжелых условиях. Для обеспечения необходимого рабочего ресурса ее обычно выполняют в виде вставки из жаропрочного материала.

В наших экспериментах сопловые вставки изготавливались из различных материалов и продувались азотом или воздухом. На рис. 1 даны размеры и примерное распределение нагрузки на внутренней поверхности такой вставки. Внешняя нагрузка равна p_0 — давлению газа в форкамере — и равномерно распределена по всей поверхности.

Теплофизические и прочностные свойства, а также условия и результаты проведенных экспериментов для некоторых материалов, из которых выполнены такие вставки, представлены в таблице.

Исследования показали, что для работы с воздухом перспективны вставки, изготовленные из дисперсно-упрочненной меди (до давлений $\approx 650 \div 700$ МПа) и тугоплавких оксидов алюминия или циркония в формах, у которых обеспечен максимально возможный отток тепла. При использовании последних, склонных к хрупкому разрушению, необходимо применять внешнюю силовую поддержку, обеспечивающую отсутствие растягивающих напряжений в теле вставки даже при нагревании ее внутреннего слоя.

При работе с техническим азотом до давлений ≈ 700 МПа наиболее перспективным материалом вставки является рений. Однако не намного меньшие давления (650 МПа) выдерживает дисперсно-упрочненная медь. Наиболее прочные сплавы, содержащие железо и вольфрам, при температуре потока свыше 900 К мо-

гут быть использованы как с воздухом, так и с техническим азотом только при условии, что внутренняя поверхность сопла будет защищена от прямого контакта с газом каким-то стойким к окислению покрытием, например слоем напыленной платины.

В настоящей работе анализируются причины, по которым дисперсно-упрочненная медь оказалась наиболее подходящим материалом для изготовления сопловых вставок. Делается это путем сравнения структур дисперсно-упрочненного сплава в исходном состоянии и после использования его в качестве сопла, а также при сравнении с танталом (после подобных нагружений).

Дисперсно-упрочненная медь представляет собой сплав $\text{Cu} + 3,5\% \text{Al}_2\text{O}_3$ (по объему), изготовленный методом порошковой металлургии, который включает следующие операции. Из сплава $\text{Cu} + 0,4\% \text{Al}$ изготавливаются порошок или стружка. Последние подвергаются внутреннему окислению при $T = 1223$ К [1],

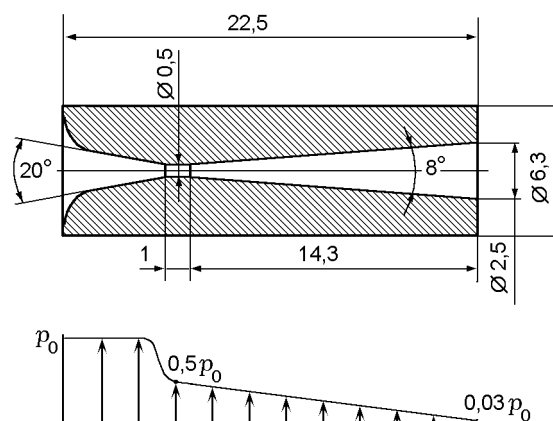


Рис. 1

Материал	ρ , г/см ³	$T_{пл}$, К	$\sigma_{вр}$, 10 ⁷ Н/м ²	p_0 , МПа	T_0 , К	t , мс	T_w , К	d , мм	Δd , мм
Медь + 3% Al ₂ O ₃	8,9	1356	20–25	541,6*	1592	280	1501	0,28	0
				656,6	1667	250	1565	0,28	0
				435,4	1515	30	1266	0,28	0
				760,0	1731	35	1457	0,28	–0,6
Рений	20,5	3453	108	816,0	1761	56	1665	0,545	0,04
				576,5	1613	42	1513	0,620	0
				706,5	1695	36	1581	0,638	0,012
				389,6*	1433	56	1358	0,650	0,005
				481,0*	1510	44	1420	0,655	0,006
Тантал	16,6	3269	31–45	467,0	1545	110	1494	0,515	–0,05

Примечание. ρ — плотность, $T_{пл}$ — температура плавления, $\sigma_{вр}$ — предел прочности, T_0 — максимальная температура в форкамере, t — время испытаний, T_w — температура поверхности горла сопла, d — диаметр горла сопла перед экспериментом, Δd — изменение диаметра горла. Звездочкой отмечены эксперименты на воздухе.

в процессе которого алюминий превращается в оксид, и конечный материал представляет собой чисто медную матрицу с распределенными в ней частицами окиси алюминия, размер которых при выбранных параметрах внутреннего окисления не превышает 30 нм. Внутреннеокисленные сплавы отличаются от жаропрочных медных сплавов стабильной структурой упрочняющей фазы до температур, близких к температуре плавления меди [2]. Так, размер частиц оксида в исходной структуре прутка, который при изготовлении нагревался до 1270 К, оставался равным 30 нм. Стабильность структуры определяет сохранение высоких прочностных свойств сплавов до температур ≈ 1070 К [2].

Монолитные образцы получали из порошковой фракции методом многоступенчатого компактирования в режиме прессования. Сначала при комнатной температуре изготавливался брикет с плотностью, сохраняющей открытую пористость. Из этого брикета, нагретого токами высокой частоты до 1270 К, выдавливался пруток с коэффициентом вытяжки $\mu = 10$. Для создания тонкой структуры и, соответственно, дополнительного упрочнения полученный пруток вторично продавливался без нагрева при $\mu = 3,7$. После такой обработки прутки имели сильно текстурированную структуру с размером зерен в поперечном сечении 2000 нм. Из прутков изготавливались сопловые вставки.

Исследование образцов проводилось с использованием растрового электронного микроскопа LEO 420, высокое разрешение которого позволило выявить в микроструктуре зерен

продольного центрального сечения прутка тонкие сдвиги, расстояние между которыми сопоставимо с размером частиц упрочняющей фазы.

Материал вставки в процессе нагружения находится в сложном напряженном и тепловом состоянии (см. рис. 1 и таблицу). Наблюдаемые изменения отверстия определяются конкурирующими процессами: уносом материала потоком нагретого газа и деформацией, обусловленной силовым воздействием при высокой температуре внутренней поверхности. Отверстие медных образцов при испытаниях не увеличивается, а, напротив, уменьшается. Это свидетельствует о том, что основное влияние на изменение отверстия сопла оказывает деформация — течение материала к центру под действием внешнего давления.

Исследования показали, что после 15 циклов нагружения в материале вставки не наблюдалось трещин и пор. Характер микроструктуры участков центрального продольного сечения отчетливо свидетельствует о том, что стенки сопла при высокой температуре поверхностного слоя подвергаются деформациям, направленным к осевой линии сопла.

На краю отверстия форма и размер ступенек сдвига свидетельствуют как о большой деформации к центру, так и о том, что медная матрица течет в основном через относительно жесткий каркас частиц оксида. Расстояние между ступеньками сдвига существенно превосходит размер частиц упрочняющей фазы и определено размером фрагментированных зерен медной матрицы, создаваемых методом производства прутка из внутреннеокисленной

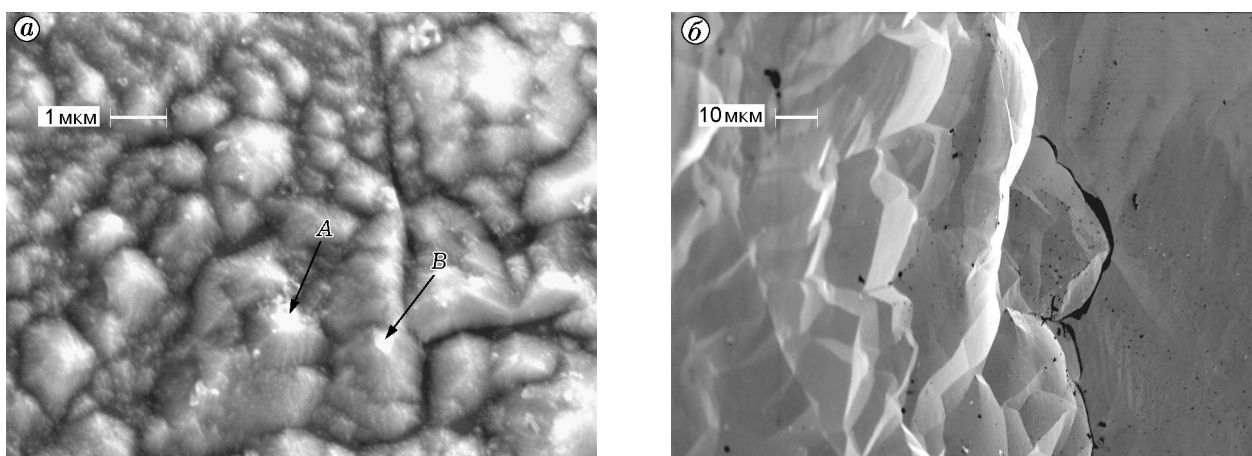


Рис. 2

фракции. Наиболее показательной представляется структура стенки горла сопловой вставки (рис. 2, *a*), где тепловые нагрузки наибольшие.

Нагретый поток газа «шлифует» стенку горла за счет выноса материала матрицы, при этом на поверхность четко выступают частицы упрочняющей фазы. Редкие плоские площадки (типа *A*, *B* на рис. 2, *a*) указывают на маловероятные срывы по определенным кристаллографическим плоскостям. Можно предположить, что после образования каркаса частиц вынос материала потоком нагретого газа уменьшается.

Преимущества структуры дисперсно-упрочненного медного сплава, созданного методом внутреннего окисления с применением ступенчатого режима прессования, наглядно проявляются при сравнении его с произведенным традиционным металлургическим методом танталом, превосходящим медные сплавы как по температуре плавления, так и по прочностным характеристикам. Сопло из тантала пластически деформировалось в первом же эксперименте (см. таблицу).

Структура используемого тантала в исходном состоянии характеризуется равноосностью прямолинейно очерченных зерен, средний размер которых равен 150 мкм. После испытания видны расслоения по границам зерен (рис. 2, *b*). Диаметр горла сопла, как и в случае с дисперсно-упрочненной медью, уменьшается. Структура зерен в сечении отверстия сопла показывает, что унос материала происходит за счет разрушения по прямолинейным границам зерен.

Поведение тантала в применяемых условиях нагружения соответствует известным представлениям о том, что при высоких температурах наиболее слабыми местами являются границы зерен, т. е. места с большой плотностью дефектов и, следовательно, с большей исходной энергией. Сильно фрагментированная и текстурированная процессами изготовления и внутреннего окисления материала структура дисперсно-упрочненной меди является энергетически более однородной по объему, не имеет выделенных локальных мест, где могли бы зарождаться микротрещины.

Таким образом, механизм износа при применяемых условиях нагружения в большой степени определяется структурным состоянием исходного материала. Сравнение дисперсно-упрочненной меди и тантала показывает, что наиболее вероятной причиной сохранения ее высокой прочности практически вплоть до температуры плавления является исходная микроструктура. При этом нельзя исключить также и теплофизические свойства материала (теплопроводность меди — 0,94 кал/(см·К·с), а тантала — 0,13 кал/(см·К·с) [3]). Из таблицы, как и из вида конечной микроструктуры, видно, что ограничение применимости меди, упрочненной частицами окисла Al_2O_3 , связано прежде всего с прочностными свойствами матрицы, так как деформации сопла были обнаружены при давлении 760 МПа, когда по проведенной оценке температура стенки была на 112 К ниже, чем при давлении 656,6 МПа.

Приведенные результаты исследования тонкой структуры отверстия вставки подтвер-

ждают указанные преимущества дисперсно-упрочненной меди.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Серебряков А. В., Бондарь М. П.** О внутреннем окислении сплавов на медной основе // Электронная микроскопия твердых тел и биологических объектов. М.: Наука, 1969. С. 83.
2. **Бондарь М. П.** Стабильность структуры внутреннеокисленных медных сплавов // Вопросы гидроимпульсной техники. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1970. Вып. 8. С. 33–42.
3. **Таблицы** физических величин: Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 44.

Поступила в редакцию 13/IV 2000 г.
