

## Исследование особенностей окисления и разрушения термодиффузионных жаростойких слоев на меди

Плетенев И.В.

Белорусский национальный технический университет

Жаростойкие покрытия, активно разрабатываемые в последние годы, обладают широким спектром функциональных возможностей [1, 2]. Опыт исследователей и собственный в области разработки специализированных термодиффузионных покрытий свидетельствует о перспективности использования комплексного диффузионного легирования меди и медных сплавов для защиты от высоких температур и агрессивной среды [3]. Насыщение при этом проводится преимущественно алюминием, и соответственно структура слоя это алюминиды меди и твердый раствор, однако насыщающая среда при комплексном насыщении еще является и источником других, сопутствующих элементов, которые помогают повысить стойкость при работе в условиях высоких температурах образуя сложные оксидные пленки (шпинели) и повысить технологичность процесса насыщения, в частности реализовать его при более низких температурах. Отметим, что в результате присутствия на поверхности меди диффузионного слоя определенной толщины, очевидно с более низким коэффициентом теплопроводности, теплопроводность всей пластины снижается. Если рассматривать работу в составе теплоотводящих элементов рассматриваемых медных пластинок эффективность работы всего устройства может быть значительно снижена.

Задачами данного исследования являлось оценить снижение теплопроводности за счет наличия на поверхности диффузионного слоя (преимущественно алюминидного), установить скорость нагрева ламельного элемента с различной толщиной защитного слоя при источнике нагрева в виде газового пламени. Изучить механизм защитного действия диффузионного слоя на меди.

Исследование проводили на специально подготовленном стенде, где осуществлялся нагрев медной пластины с диффузионным слоем размером 50x20x2мм, с разной интенсивностью, а также осуществлялся контроль температуры «холодной» и «горячей» части медной ламели (рисунок 1).

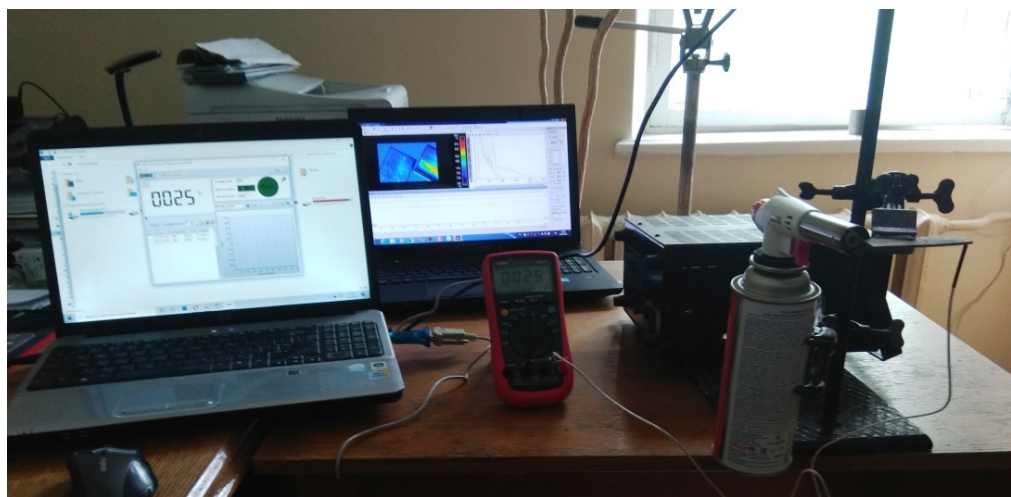


Рисунок 2 – Стенд для исследования теплопроводности упрочненных термодиффузией образцов при источнике нагрева в виде пламени пропан-бутановой газовой смеси

Измерение температуры и регистрация ее распределения (в зоне высоких температур) выполнялись с использованием измерителя температурного оптического ИТ-3СМ (высокотемпературный трехзональный термовизор). Кроме этого, дополнительно, контроль температуры на элементах выполнялся термометром инфракрасным Mestek IR01D, а регистрация

температуры «холодной» части пластины мультиметром UNI-T UT61C с термопарой, с записью данных на компьютер через порт RS232. Основной факел газового пламени был проходящим, «контактировал» с торцом медной пластины (ламели) или максимально к нему приближался (рисунок 2).

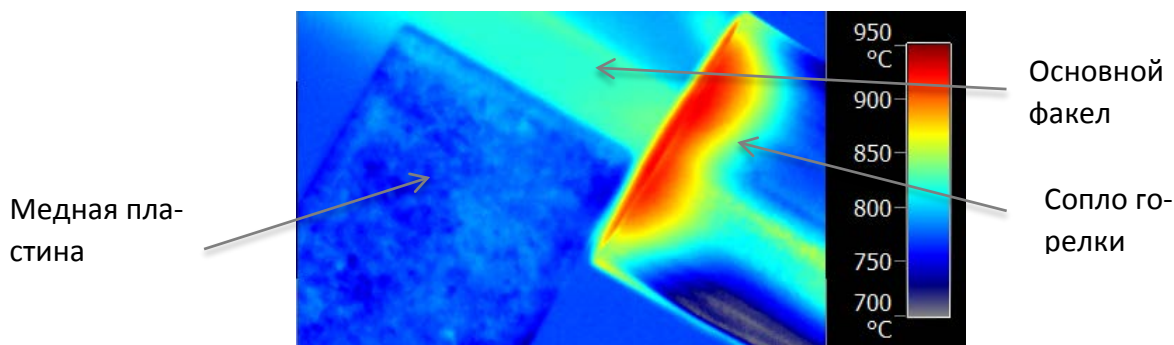


Рисунок 2 – Позиционирование источника нагрева относительно исследуемого образца

В результате исследований получены данные о скорости нагрева медной пластины (ламели) при выбранном источнике нагрева. В исследовании принимали участие образцы с термодиффузионным жаростойким покрытием различной толщины и исходный медный образец без упрочнения (рисунок 3).

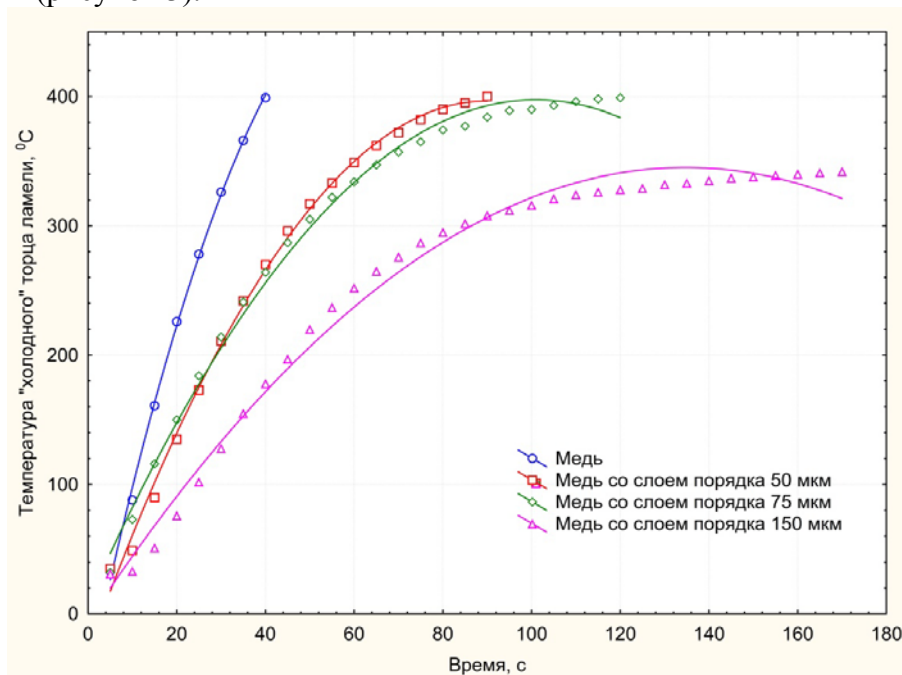


Рисунок 3 – Скорость нагрева «холодного» торца медной пластины

По результатам исследований необходимо отметить значительное снижение теплового потока и снижение теплопередачи от горячего теплоносителя к медной основе ламели. Скорость нагрева для медного образца без диффузионного слоя с интервале температур 0 - 400 °C получилась порядка 10 °C/c, а для образца с максимальным рассматриваемым диффузионным слоем 4,5 °C/c, что косвенно свидетельствует о значительном снижении интегрального коэффициента теплопроводности всего ламельного элемента. Кроме этого стоит отметить, что снижение скорости нагрева происходит практически пропорционально увеличению толщины диффузионного слоя. В результате термодиффузионный слой с большой толщиной является существенным фактором в ограничении применения соответствующих слоев, поскольку эффективность теплоотводящих элементов резко снижается.

Для выявления механизма защитного действия диффузионного слоя были изучены микроструктуры до окисления и после при высоких температурах (нагрев до 800°C). Установлено, что при испытаниях на образцах происходит рост толщины слоя вглубь ламели и перераспределение концентрации алюминия, «рассасывание» слоя. За 25 ч испытаний за счет увеличения зоны  $\alpha$ -твердого раствора слой увеличился на 10...20 %. Такое перераспределение приводит к заметному обеднению поверхностных слоев алюминием, подтверждение этому является внешний вид образцов, цвет которых меняется от металлического к бронзовому. Предположительно, бронзовый цвет это пленка двойного окисла  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  (рисунок 4).

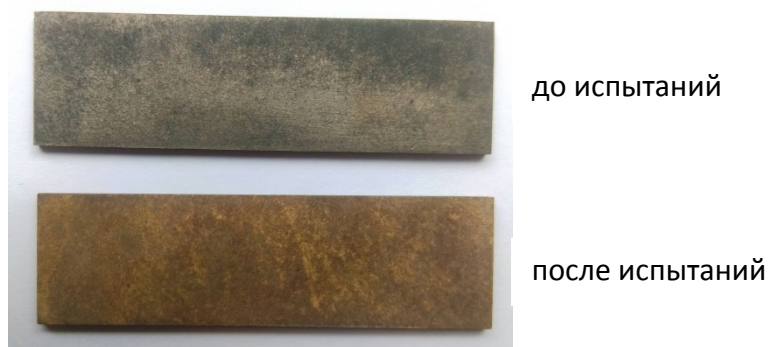


Рисунок 4 – Внешний вид алитированных образцов меди до и после испытаний

### Литература

1. Минкевич, А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.
2. Коломыцев, П.Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П.Т. Коломыцев. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с.
3. В.М. Константинов Исследование особенностей структуры и свойств термодиффузионных жаростойких покрытий на меди / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, И.В. Плетенев // Литье и металлургия. №1, 2021. – С. 124 – 129.