



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 666.1.002.5

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук, проф.
заведующий кафедрой «Материаловедение в машиностроении»¹
E-mail: materialovedenie@bntu.by

И.В. ПЛЕТЕНЕВ
аспирант кафедры «Материаловедение в машиностроении»¹
E-mail: ipletenev@mail.ru

В.Г. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц.
доцент кафедры «Материаловедение в машиностроении»¹
E-mail: vladimir_dvl@tut.by

М.А. СУДНИКОВ
аспирант кафедры «Материаловедение в машиностроении»¹
E-mail: mitrofan15@mail.ru

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 04.05.2023.

СТРУКТУРНЫЙ МЕХАНИЗМ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕДНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ТЕРМОДИФФУЗИОННЫМ АЛИТИРОВАННЫМ СЛОЕМ

Проведена общая оценка вариантов повышения стойкости элементов теплоотводящих устройств, изготовленных из меди. Исследована особенность высокотемпературного коррозионного разрушения, термодиффузионного, алюминий содержащего, защитного слоя на меди марки М1, как наиболее часто встречающейся причины потери работоспособности. Показан предполагаемый механизм разрушения термодиффузионного защитного слоя на ламельном элементе холодильника стекольного производства, который обусловлен двумя конкурирующими процессами — «рассасыванием» слоя и структурными изменениями при фазовом взаимодействии. Исследованы особенности механического разрушения защитного слоя при чистом изгибе и формировании проникающих трещин вглубь изделия. Методом наноиндентирования изучены упругопластические свойства основных структурных составляющих диффузионного слоя, установлены показатели их индекса пластичности.

Ключевые слова: термодиффузионные слои, хрупкость, интерметаллиды, алюминиды меди, жаростойкость меди

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-51-59>

Введение. Медь — эффективный проводник тепла, широко используется в различных теплоотводящих устройствах, которые применяются в металлургической, химической промышленности, в энергетике. Эти устройства способны разрушаться под действием множества факторов, в некоторых случаях с катастрофической скоростью.

Известно, что медь имеет низкую стойкость при высоких температурах, активно окисляется при температурах выше 400 °С, оксиды меди обладают низкой стойкостью в условиях механического воздействия. В настоящее время процесс такого разрушения достаточно хорошо изучен и установлены кинетические кривые окисления. Суще-

ственный вклад в развитие теории высокотемпературного окисления и механизма разрушения внесли такие ученые как Кофстад П., Вагнер К., Жу Ю. [1–4]. Существующая теория, прежде всего, рассматривает поведение меди в окислительной атмосфере воздуха.

Создание барьерного слоя на поверхности изделия наиболее эффективно для защиты меди и медных сплавов от высоких температур и агрессивной среды. Стоит выделить следующие технологии и материалы, используемые в промышленности:

- защитные покрытия систем легирования Ni и Ni-P, Ni-B, полученные электрохимическим способом (характеризуются высокой стоимостью и ограничениями по форме и размерам обрабатываемых изделий);

- газотермические покрытия, полученные напылением на поверхность материала (обычно в качестве напыляемых материалов используются никелевые порошки или порошки алюминия; характеризуются трудностью напыления на изделия, имеющие сложную пространственную форму);

- термодиффузионное насыщение элементами, образующими при окислении плотные, устойчивые оксидные слои (алюминий, кремний) [5].

В области упрочнения химико-термической обработкой медьсодержащих сплавов известны работы российских (Земскова Г.В., Вавилонской Н.В., Гордевой Л.Т., Григоряна Г.В., Украинцева А.Е.) и зарубежных (Габриель Пластенсия, Танаи Марин) ученых [7–9]. Значительный вклад в развитие технологий термодиффузионного упрочнения меди и медных сплавов также внесли специалисты и ученые кафедры «Материаловедение в машиностроении» и лаборатории упрочнения стальных изделий Белорусского национального технического университета — Ляхович Л.С., Ворошнин Л.Г., Кухарев Б.С., Кухарева Н.Г., Ситкевич М.В., Зябкин Г.В. [10, 11].

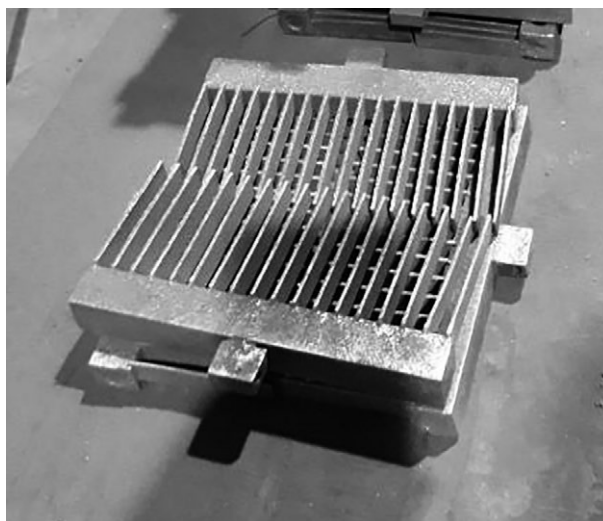
Такие технологии эффективно применяются при изготовлении и упрочнении теплоотводящих устройств стекольного производства, в частности подфиллерных холодильников, которые предназначены для интенсификации отвода тепла от филлера в месте выхода стеклонитей различного состава. Конвективное охлаждение стекломассы за счет использования медного холодильника позволяет исключить вероятность обрыва стекловолокна и повысить его качество.

Подфиллерный холодильник ламельной конструкции (рисунок 1) выполняется из меди и конструктивно представляет собой водоохлаждаемый корпус (2) со штуцерами для подачи воды (1), прикрученными или припаянными к корпусу, и теплоотводящими ребрами-ламелями (3).

Для научно обоснованного повышения долговечности описанных выше теплоотводящих устройств стекольного производства необходи-



a



b

Рисунок 1 — Устройство медного холодильника стекольного производства ламельной конструкции: а — холодильник без покрытия (тип с впаивным штуцером); б — холодильник после упрочнения (тип с резьбовым штуцером)

Figure 1 — Device of the copper cooler of glass production of lamellar design: a — uncoated cooler (type with soldered fitting); b — cooler after hardening (type with threaded fitting)

мо детальное изучение механизма потери работоспособности холодильников с защитным слоем диффузионного типа, что является достаточно сложной задачей по причине многообразия факторов, влияющих на стойкость.

Исследовательская часть. В данной части работы анализировался вариант комплексного насыщения поверхности холодильника стекольного производства, преимущественно алюминием из порошковой среды оригинального состава. Дополнительно такая среда кроме алюминия как основного элемента содержит продукты реакции алюминотермического восстановления оксидов бора и хрома и представляет собой конгломерат фаз (Al_2B , $CrAl_4$). Сами по себе продукты восстановления в порошковом виде (после измельчения) имеют пористую структуру и, соответственно, развитую поверхность, обеспечивая при этом повышенную газопроницаемость насыщающей среды. Активный бор в смеси — это раскисля-

ющий и флюсующий элемент — позволяет эффективнее взаимодействовать с участками обрабатываемых изделий, имеющих загрязнения, особенно на начальных стадиях химико-термической обработки, способствуя повышению качества процесса и снижению дефектности. Кроме этого, дополнительное участие хрома и бора в составе порошковой смеси обеспечивает дополнительное легирование образующегося алюминидного слоя.

Поскольку основным элементом в насыщающей смеси, определяющим структурообразование термодиффузионного слоя, является алюминий, то слой практически полностью соответствует традиционно получаемому после алитирования [12, 13]. В процессе насыщения формируются три зоны [14]: комплекс алюминидных фаз (две зоны) в виде твердых растворов на основе соединений Cu_3Al , Cu_9Al_4 и Al_2Cu_3 , а также переходная зона, представляющая собой α -фазу. На поверхности рентгеноструктурным анализом также обнаруживается фаза Al_2O_3 как результат взаимодействия с кислородом воздуха уже сформировавшегося диффузионного слоя. Результаты рентгеноспектрального анализа свидетельствуют о концентрации алюминия в поверхностных слоях до 26 масс. % (рисунок 2).

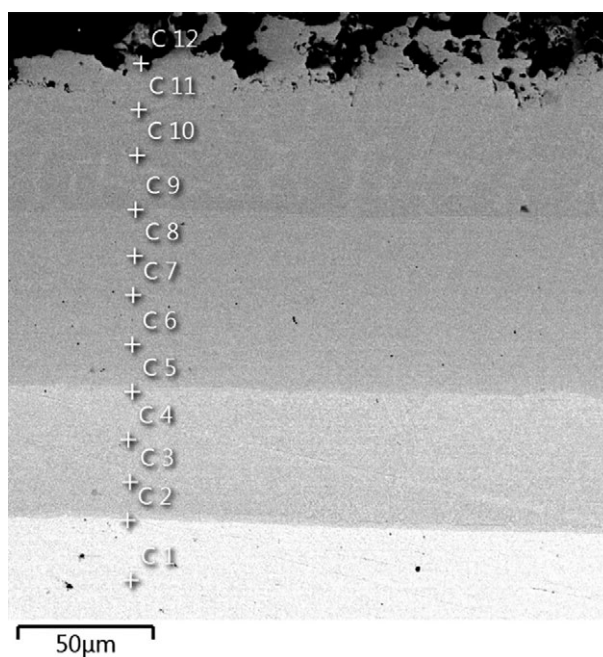
Повышение ресурса холодильника стекольного производства в значительной степени зависит от развития представлений о механизме разрушения термодиффузионного слоя на меди.

Установлено, что разрушение термодиффузионных слоев на меди в процессе производственной эксплуатации происходит по двум основным причинам (рисунок 3):

1) разрушение в условиях высокотемпературной коррозии при активном воздействии кислорода воздуха и паров соединений, формирующих агрессивную среду и образующих дополнительное коррозионное воздействие при непосредственной выработке стеклонити;

2) разрушение при облуживании и наладке ламельных элементов холодильника в результате растрескивания термодиффузионного слоя.

Как отмечено выше, первый тип разрушения вызван условиями работы. Они для теплоотводящих элементов стекольного производства ламельного типа на примере производства стекловолна марки Е сложные, имеют циклический характер, температура в зоне отвода тепла составляет от 1160 до 1260 °С. Агрессивную атмосферу формируют компоненты шихты при стекловарении, борная кислота (если выпускается модификация с бором), ее соли, оксиды металлов и некоторые их соединения, а также фториды, т. е. основными факторами, способствующими разрушению изделий, являются высокая температура, которая усугублена коррозионным воздействием в виде паров компонентов шихты при стекловарении, а также термоциклированием за счет кратковременных



a

Название спектра	Al, масс. %	Cu, масс. %
C 1	Менее 0,1	100,0
C 2	5,6	94,4
C 3	12,7	87,2
C 4	12,7	87,2
C 5	13,2	86,8
C 6	19,9	80,1
C 7	20,9	79,0
C 8	22,3	77,6
C 9	23,5	76,4
C 10	24,2	75,8
C 11	23,8	76,2
C 12	26,3	73,7

b

Рисунок 2 — Микроструктура диффузионного слоя (a) и типовое распределение элементов по глубине (b)
 Figure 2 — Microstructure of the diffusion layer (a) and typical distribution of elements by depth (b)



Рисунок 3 — Причины потери работоспособности холодильников стекольного производства
 Figure 3 — Reasons for the operability loss of the coolers of glass production

остановок процесса производства стеклонити для обслуживания и вынужденных простоев, связанных с цикличностью производства.

Механизм высокотемпературного окисления меди был объектом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований на протяжении многих лет.

Установлено [1], что в температурном интервале 350–1050 °С медь окисляется по параболическому временному закону. Температурные зависимости константы параболической скорости окисления разнятся по данным нескольких авторов [1–4] и колеблются от 8 до 16, значения энергии активации процесса тоже не всегда совпадают и находятся в пределах 39–223 кДж/моль. Как правило, на температурной зависимости окисления меди можно выделить три участка: высокотемпературный (900–1050 °С), промежуточный (600–850 °С) и низкотемпературный (350–550 °С).

Разрушение термодиффузионных слоев, по нашему мнению, происходит в определенной после-

довательности (рисунок 4). Этапы обусловлены диффузионным «рассасыванием» слоя в процессе.

Структура слоев, представляющая собой слоистую систему, перераспределяется в процессе работы. На первой стадии (см. рисунок 4, этапы 1, 2) претерпевают изменения зоны 1 и 2 (условные части слоя по глубине), в результате нагрева от комнатной температуры порядка 20 до 750 °С происходит растворение фаз $\alpha + \gamma_2$ с образованием β -фазы. При дальнейшей эксплуатации (этап 3) происходит фрагментарное разрушение оксидного слоя в наружной зоне 1, что обусловлено растягивающими напряжениями, формирующимися температурным расширением медной сердцевины и утончением защитного оксидного слоя за счет выгорания легирующих элементов. В процессе дальнейшей эксплуатации (см. рисунки 4, 5 а, этап 4) идет проникновение кислорода воздуха окружающей среды, образование различных оксидов на основе алюминия и меди.

Очаги коррозии разрастаются, увеличивается их количество. В зоне 2 идет процесс «рассасы-

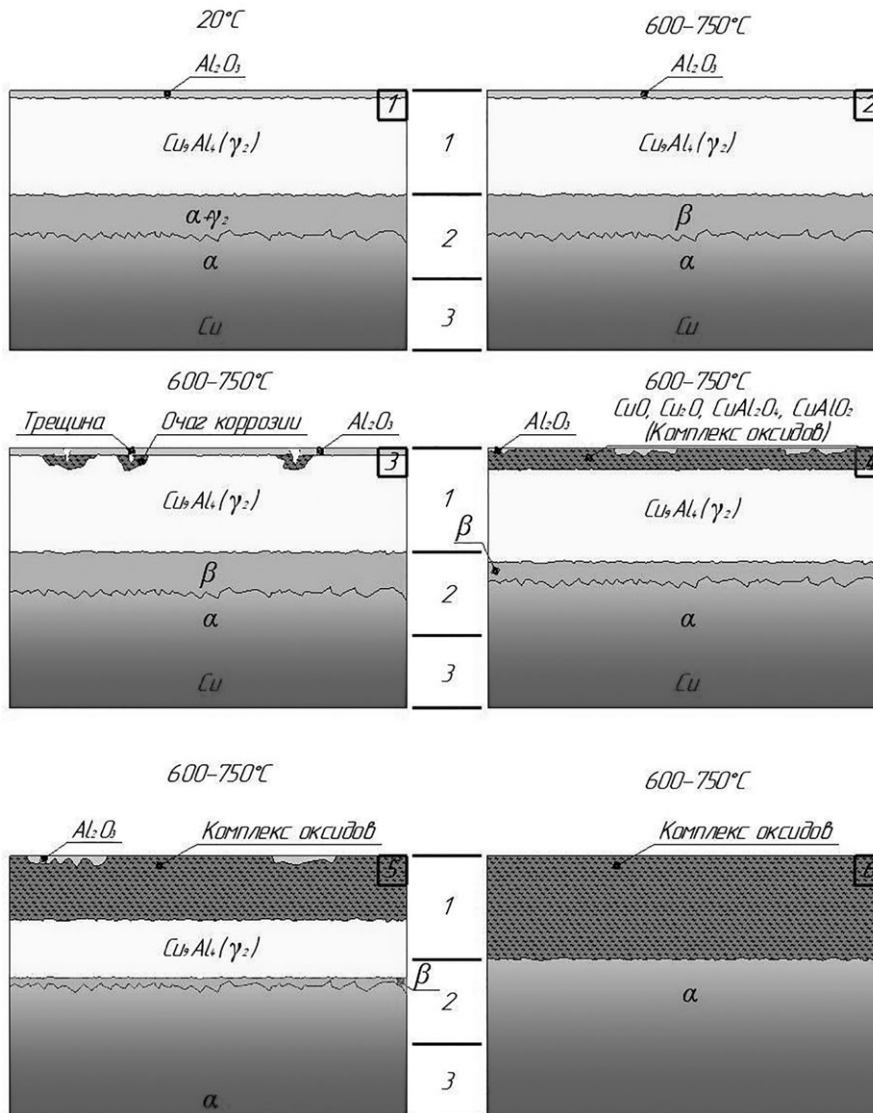


Рисунок 4 — Механизм разрушения термодиффузионного слоя в условиях промышленной эксплуатации
 Figure 4 — Mechanism of destruction of the thermodiffusion layer in industrial operation

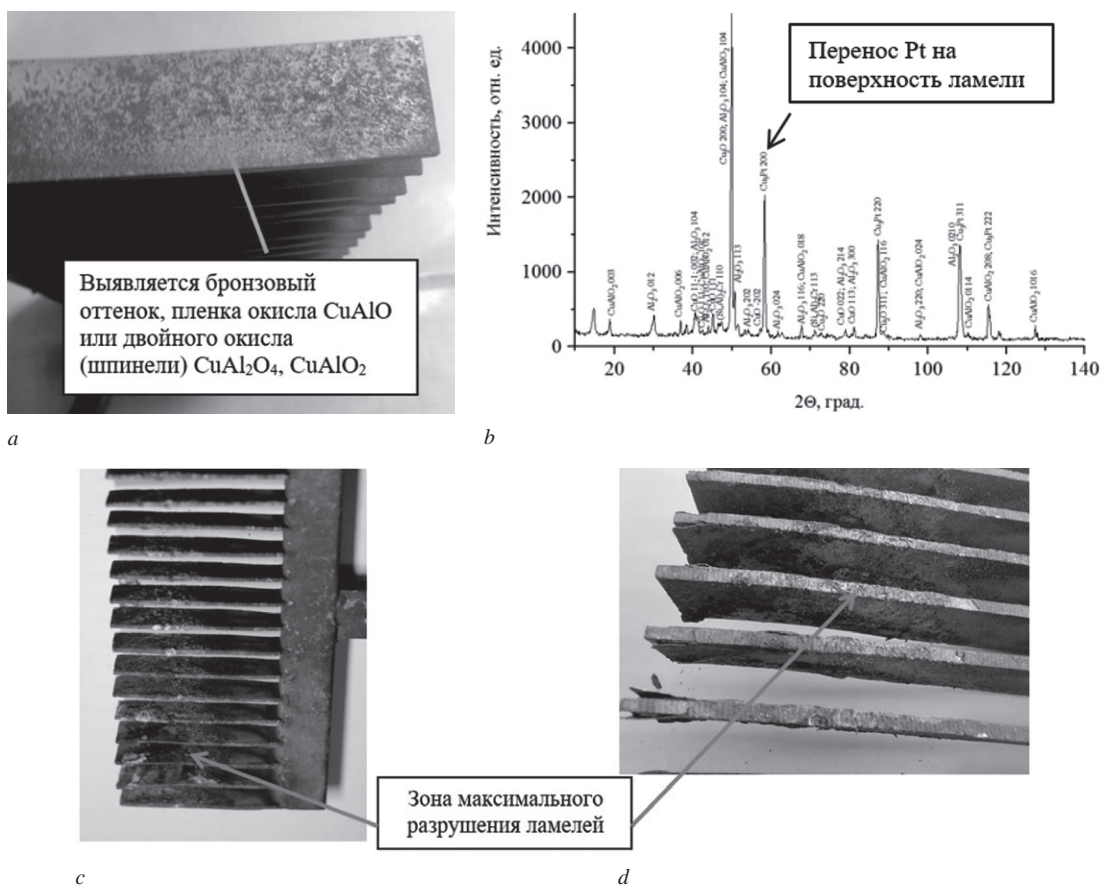


Рисунок 5 — Внешний вид ламельного холодильника после эксплуатации, износ ~80 % (a) и фазовый состав диффузионного слоя (b), внешний вид ламельного холодильника после эксплуатации с полным износом диффузионного слоя (c, d)
 Figure 5 — Appearance of the lamellar cooler after operation, wear ~80 % (a) and the phase composition of the diffusion layer (b), appearance of the lamellar cooler after operation with complete wear of the diffusion layer (c, d)

вания» β -фазы, вплоть до ее исчезновения (см. рисунок 4, этап б), сама фаза является источником дополнительных атомов для расширения зоны γ_2 . Окончательное разрушение ламели происходит на этапах 5, 6 (см. рисунки 4, 5 c, d). В зоне 2 окончательно исчезает β -фаза, подпитывающая фазу γ_2 , сразу после этого идет резкое вырождение фазы γ_2 . В зоне 1 из-за недостаточности «подпитки» алюминием прогрессирует процесс окисления на поверхности. Оксидный слой активно растет в глубину. В итоге слоистая система барьерного (защитного) слоя преобразуется в однородный оксидный слой и зону твердого раствора. В зоне 3 от слайда 1 до слайда 6 происходит процесс расширения области α твердого раствора за счет «рассасывания» алюминия.

Необходимо отметить установленный факт переноса металла с поверхности фильеры на ламели холодильника. Результаты фазового анализа указывают на активный перенос жаростойкой платины с поверхности фильеры, где она используется в качестве защитного покрытия, на холодильник (см. рисунок 5 b).

Второй тип разрушения связан с низкими упругопластическими свойствами диффузионных слоев. Как отмечают исследователи, определяющим для хрупкости алитированного слоя на меди является фаза Cu_9Al_4 , кроме этого, она,

в нашем случае, является основной в слое, ее доля, как правило, более 50 %. Дополнительно в слое присутствует фаза Al_2O_3 находящаяся на поверхности, поэтому мы наблюдаем зарождение трещины с поверхности. Развитость и высокая сплошность фазы оксида алюминия обычно достигается за счет дополнительного специального окисления уже обработанной продукции в печи с окислительной атмосферой. Растрескивание происходит с самого верхнего слоя оксида алюминия, пластичность слоев, лежащих более глубоко, достаточна для деформации на соответствующий угол, трещина до углов загиба более 35° , как правило, не распространяется в основной металл, а локализуется в диффузионном слое. Характерным местом появления трещин является зона, расположенная непосредственно в месте крепления (пайки) и края ламели за счет проявления краевого эффекта в процессе насыщения (рисунок 6).

В результате анализа поведения пластинчатого материала с различной толщиной алитированного термодиффузионного слоя можно отметить преимущественно параболическую зависимость угла загиба и нагрузки, спровоцировавшей его (рисунок 7).

Для образующихся интерметаллидов в справочной литературе найти значения модуля упру-

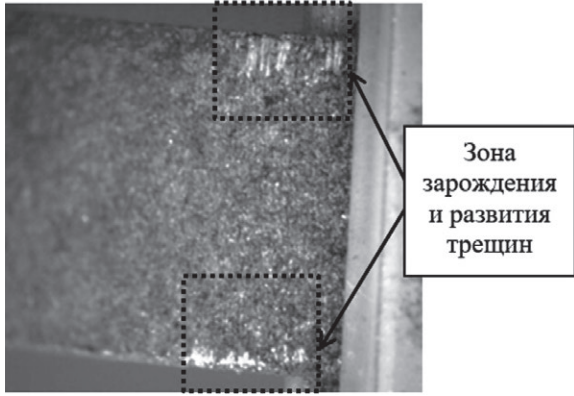


Рисунок 6 — Внешний вид образцов в момент зарождения и роста поперечных трещин в пластине с термодиффузионным слоем при изгибе

Figure 6 — Appearance of samples at the moment of the origin and growth of transverse cracks in a plate with the thermodiffusion layer during bending

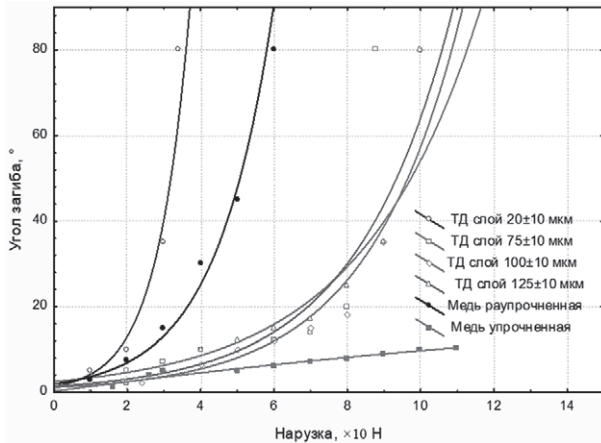


Рисунок 7 — Зависимость угла загиба пластинчатого элемента, характеризующего разрушение диффузионного слоя и изгибающей нагрузки

Figure 7 — Dependence of the bending angle of the plate element characterizing the destruction of the diffusion layer and the bending load

гости и других показателей механических свойств достаточно тяжело. Кроме этого, отметим, что правильное соотношение модуля упругости в слоистой системе диффузионного слоя предопределяет поведение материала при изгибающих нагрузках. Модуль упругости самого жесткого элемента слоя, если не принимать во внимание Al_2O_3 , структурной составляющей Cu_9Al_4 — 263 ± 9 ГПа (таблица). Большая доля и высокая хрупкость фазы Cu_9Al_4 определяет общее поведение материала

при изгибе, существенно вносит вклад в общую жесткость.

В последние годы метод наноиндентирования широко используется для исследования различного рода покрытий, в том числе диффузионного типа [14, 15]. В настоящей работе методом наноиндентирования проведена оценка развития упругой и пластической деформации в различных зонах термодиффузионного алюминийсодержащего слоя на меди марки М1 (см. таблицу, рисунок 8). Испытания проводили при нагрузке 0,1 и 0,05 Н трехгранной пирамидой Берковича, анализ кривых выполняли по методике Оливера–Фарра.

В работе проводилась оценка индекса пластичности (H/E^*), эта величина характеризует отношение величины нанотвердости (H) и приведенного модуля упругости (E^*), и соответственно, способность материала изменять свою форму и размер в процессе деформации, а также служит качественной сравнительной характеристикой сопротивления материалов деформации при механическом нагружении (см. таблицу). По полученным данным видно, что α -твердый раствор имеет модуль Юнга, равный 156 ± 6 ГПа, что приблизительно в 1,5 раза выше традиционного значения для меди. Кроме этого, показано, что твердый раствор на базе химического соединения Cu_9Al_4 имеет в 8,5 раз ниже индекс пластичности, чем α -твердый раствор, что предопределяет его низкую стойкость к растрескиванию.

Отметим одну особенность: по полученным отпечаткам (см. рисунок 8, зоны 2 и 3) заметно выдавливание материала вокруг их самих, что, безусловно, изменяет контактную площадь индентора и образца при взаимодействии и вносит погрешности в измерение.

Заключение. Установлен механизм потери работоспособности медных холодильников стекольного производства с термодиффузионными защитными слоями в процессе промышленной эксплуатации. Основной особенностью этого механизма является протекание двух конкурирующих процессов: «рассасывание» термодиффузионного слоя и структурные, деструктивные изменения при фазовом взаимодействии. Дополнительным фактором, способным резко снизить срок службы холодильников стекольного производства, является растрескивание слоя при принудительной деформации lamellar элементов или за счет термических напряжений, возникающих

Таблица — Микромеханические свойства зон термодиффузионных слоев на меди
Table — Micromechanical properties of zones of thermodiffusion layers on copper

Зона контроля	Твердость HV	Модуль Юнга, ГПа	Индекс пластичности H/E^*	Показатель упругого восстановления H^2/E^*	Сопротивление пластической деформации H^3/E^{*2}
1	1420 ± 70	263 ± 9	0,0559	0,8223	0,04598
2	520 ± 50	200 ± 7	0,0283	0,1602	0,00454
3	105 ± 5	156 ± 6	0,0066	0,0068	0,00005

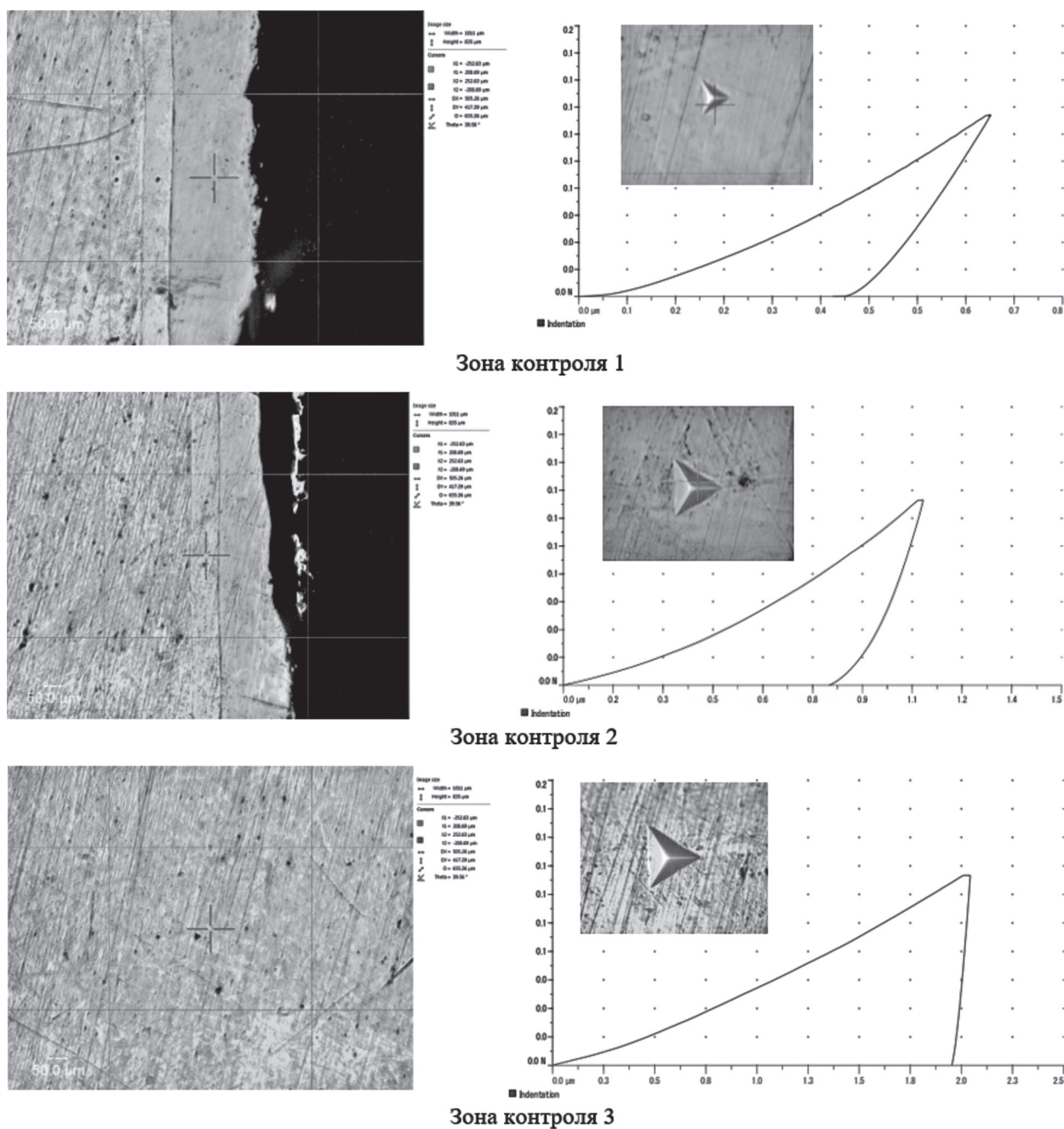


Рисунок 8 — Микроструктура зон контроля 1, 2, 3 и кривые нагружения после микроиндентирования с отпечатками
 Figure 8 — Microstructure of control zones 1, 2, 3 and loading curves after microindentation with prints

при эксплуатации и термоциклировании. Отмечено плавное изменение микродиаметрических показателей от поверхности в основу, способствующее снижению опасности растрескивания слоя в области высоких температур и деформации.

Индекс пластичности по толщине термодиффузионного слоя изменяется в несколько раз (по данным исследований до 8,5 раз), но переход осуществляется через развитую фазу твердого раствора на базе соединения Cu_3Al , что снижает риск зарождения и распространения трещины. Установлен определяющий вклад в жесткость и хрупкость lamellarного элемента фазы Cu_9Al_4 и указаны характерные места зарождения трещины при

изгибе. Предложен эффективный путь повышения долговечности работы lamellarного элемента с термодиффузионным алитированным слоем на меди, это контроль количества фазы Cu_9Al_4 , а также целостность и сплошность слоя оксида алюминия на поверхности. Уменьшение толщины слоя и, соответственно, фазы Cu_9Al_4 способствует повышению пластичности, что согласуется с графиком зависимости угла загиба пластинчатого элемента. Методом наноиндентирования изучены упруго-пластические свойства основных структурных составляющих диффузионного алюмосодержащего защитного слоя на меди, установлены показатели индекса пластичности всех характерных зон слоя.

Список литературы

1. Высокотемпературное окисление меди в рамках подхода окислительного конструирования / В.Ю. Зуфман [и др.] // Физика и химия обработки материалов. — 2017. — № 3. — С. 86–91.
2. Белоусов, В.В. Высокотемпературное окисление меди / В.В. Белоусов, А.А. Климашин // Успехи химии. — 2013. — Т. 82, № 3. — С. 273–288. — DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2013v082n03ABEH004343>.
3. Kofstad, P. High-temperature corrosion / P. Kofstad. — London: Elsevier Applied Science, 1988. — Ch. 11. — Pp. 382–385.
4. Influence of high-temperature aluminizing treatment on the corrosion resistance of 90/10 copper-nickel alloy / Y. Gao [et al.] // Anti-Corrosion Methods and Materials. — 2021. — Vol. 68, no. 5. — Pp. 365–372. — DOI: <https://doi.org/10.1108/ACMM-04-2021-2467>.
5. Николаев, А.К. Жаропрочные (низколегированные) сплавы на основе меди / А.К. Николаев // Медь. Латунь. Бронза: сб. тр. / ОАО «Институт Цветметобработка»; под общ. ред. Ю.Н. Райкова. — М., 2006. — С. 21–52.
6. Коломыйцев, П.Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П.Т. Коломыйцев. — М.: Металлургия, 1979. — 272 с.
7. Украинцев, А.Е. Разработка составов и создание на меди диффузионных слоев электродуговой металлизацией с последующей термообработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06 / А.Е. Украинцев; Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. — М., 2010. — 22 с.
8. Дубинин, Г.Н. Жаростойкость и коррозионная стойкость меди и бронзы после алитохромирования / Г.Н. Дубинин, В.С. Соколов // Защитные покрытия на металлах. — 1979. — Вып. 13. — С. 79–82.
9. Вавиловская, Н.Г. Окалиностойкость и сопротивление истиранию меди, диффузионно-насыщенной алюминием, никелем, цирконием / Н.Г. Вавиловская, Л.Г. Тимонина // Защитные покрытия на металлах. — 1971. — Вып. 5. — С. 177–179.
10. Ляхович, Л.С. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Л.С. Ляхович. — М.: Металлургия, 1981. — 424 с.
11. Ситкевич, М.В. Бельский, Е.И. Совмещенные процессы химикотермической обработки с использованием обмазок / М.В. Ситкевич, Е.И. Бельский. — Минск: Выш. шк., 1987. — 156 с.
12. Акимов, В.А. Создание диффузионных слоев на меди в защитной среде / В.А. Акимов, А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов // Цветные металлы. — 2010. — № 7. — С. 67–69.
13. Радюк, А.Г. Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, А.Е. Украинцев // Цветные металлы. — 2007. — № 5. — С. 95–97.
14. Константинов, В.М. Исследование особенностей структуры и свойств термодиффузионных жаростойких покрытий на меди / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, И.В. Плетенев // Литье и металлургия. — 2021. — № 1. — С. 124–129. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-124-129>.
15. Дашкевич, В.Г. Анализ и прогнозирование упругопластических свойств термодиффузионных слоев на медной подложке / В.Г. Дашкевич, И.В. Плетенев, М.А. Судников // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. / редкол.: И.А. Иванов (гл. ред.) [и др.]. — Минск: БНТУ, 2022. — Вып. 43. — С. 219–229.
16. Дуб, С.Н. Испытание твердых тел на нанотвердость / С.Н. Дуб, Н.В. Новиков // Сверхтвердые материалы. — 2004. — № 6. — С. 16–33.
17. Oliver, W.C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W.C. Oliver, G.M. Pharr // J. Mater. Res. — 2004. — Vol. 19, iss. 1. — Pp. 3–20. — DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>.

KONSTANTINOV Valery M., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department “Materials Science in Mechanical Engineering”¹

E-mail: materialovedenie@bntu.by

PLETENEV Ilya V.

Ph. D. Student of the Department “Materials Science in Mechanical Engineering”¹

E-mail: ipletenev@mail.ru

DASHKEVICH Vladimir G., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department “Materials Science in Mechanical Engineering”¹

E-mail: vladimir_dvl@tut.by

SUDNIKOV Mitrofan A.

Ph. D. Student of the Department “Materials Science in Mechanical Engineering”¹

E-mail: mitrofan15@mail.ru

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 04 May 2023.

STRUCTURAL MECHANISM OF PERFORMANCE LOSS OF COPPER COOLERS OF GLASS PRODUCTION WITH THERMAL DIFFUSION PROTECTIVE LAYER

A general assessment of options for increasing the resistance of elements of heat-removing devices made of copper is carried out. The peculiarity of high-temperature corrosion destruction of thermal diffusion aluminum-containing protective layer on M1 grade copper as the most common cause of loss of efficiency is studied. The proposed mechanism for the destruction of the thermal diffusion protective layer on the lamel-

lar element of a cooler of glass production is shown, which is caused by two competing processes — layer “resorption” and structural changes during phase interaction. The mechanical destruction features of the protective layer are studied during pure bending and the formation of penetrating cracks deep into the product. The elastoplastic properties of the main structural components of the diffusion layer are studied by the nanoindentation method, and the values of their plasticity index are established.

Keywords: thermal diffusion layers, brittleness, intermetallic compounds, copper aluminides, heat resistance of copper

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-51-59>

References

- Zufman V.Yu., et al. Vysokotemperaturnoe okislenie medi v ramkakh podkhoda oksislitel'nogo konstruirovaniya [High-temperature oxidation of copper using oxidative constructing approach]. *Physics and chemistry of materials treatment*, 2017, no. 3, pp. 86–91 (in Russ.).
- Belousov V.V., Klimashin A.A. Vysokotemperaturnoe okislenie medi [High-temperature oxidation of copper]. *Russian chemical reviews*, 2013, vol. 82, no. 3, pp. 273–288. DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2013v082n03ABEH004343> (in Russ.).
- Kofstad P. *High-temperature corrosion*. London, Elsevier Applied Science, 1988. Ch. 11, pp. 382–385.
- Gao Y., et al. Influence of high-temperature aluminizing treatment on the corrosion resistance of 90/10 copper-nickel alloy. *Anti-corrosion methods and materials*, 2021, vol. 68, no. 5, pp. 365–372. DOI: <https://doi.org/10.1108/ACMM-04-2021-2467>.
- Nikolaev A.K. Zharoprochnye (nizkolegirovannye) splavy na osnove medi [Heat-resistant (low-alloyed) alloys based on copper]. *Med. Latun. Bronza*, 2006, pp. 21–52 (in Russ.).
- Kolomytsev P.T. Zharostoykie diffuzionnye pokrytiya [Heat-resistant diffusion coatings]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 272 p. (in Russ.).
- Ukrainsev A.E. *Razrabotka sostavov i sozдание na medi diffuzionnykh sloev elektrodugovoy metallizatsiy s posleduyushchey termoobrabotkoy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of compositions and creation of diffusion layers on copper by electric arc metallization with subsequent heat treatment. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Moscow, 2010. 22 p. (in Russ.).
- Dubinin G.N., Sokolov V.S. Zharostoykost i korrozionnaya stoykost medi i bronzy posle alitokhromirovaniya [Heat resistance and corrosion resistance of copper and bronze after alitochrome plating]. *Zashchitnye pokrytiya na metallakh*, 1979, iss. 13, pp. 79–82 (in Russ.).
- Vavilovskaya N.G., Timonina L.G. Okalinostoykost i soprotivlenie istiraniyu medi, diffuzionno-nasyshchennoy alyuminiem, nikelom, tsirkoniem [Scale resistance and abrasion resistance of copper diffusion-saturated with aluminum, nickel, zirconium]. *Zashchitnye pokrytiya na metallakh*, 1971, iss. 5, pp. 177–179 (in Russ.).
- Lyakhovich L.S. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 424 p. (in Russ.).
- Sitkevich M.V., Belskiy E.I. *Sovmeshchennye protsessy khimikotermicheskoy obrabotki s ispolzovaniem obmazok* [Combined processes of chemical-thermal treatment using coatings]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1987. 156 p. (in Russ.).
- Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Sozдание diffuzionnykh sloev na medi v zashchitnoy srede [Generation of diffused layers on copper in the shielding atmosphere]. *Tsvetnye metally*, 2010, no. 7, pp. 67–69 (in Russ.).
- Akimov V.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Formirovanie diffuzionnykh sloev na poverkhnosti medi i ee splavov [Forming of diffusion layers on the surface of copper and its alloys]. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 5, pp. 95–97 (in Russ.).
- Konstantinov V.M., Dashkevich V.G., Pletenev I.V. Issledovanie osobennostey struktury i svoystv termodiffuzionnykh zharostoykikh pokrytiy na medi [Study of structural features and properties of thermodiffusion heat resistant coatings on copper]. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 124–129. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-124-129> (in Russ.).
- Dashkevich V.G., Pletenev I.V., Sudnikov M.A. Analiz i prognozirovanie uprugoplasticheskikh svoystv termodiffuzionnykh sloev na mednoy podlozhke [Analysis and prediction of elastic-plastic properties of thermodiffusion layers on a copper substrate]. *Metallurgiya*, 2022, iss. 43, pp. 219–229 (in Russ.).
- Dub S.N., Novikov N.V. Ispytanie tverdykh tel na nanotverdost [Testing solids for nanohardness]. *Sverkhтвердые материалы*, 2004, no. 6, pp. 16–33 (in Russ.).
- Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of materials research*, 2004, vol. 19, iss. 1, pp. 3–20. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>.