

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.15>

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОМЕТАЛЛОКОМПОЗИТА

Научная статья

Нагаева М.В.^{1*}, Гончарук В.К.²

¹ Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Российская Федерация

² Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (nagaevamv[at]mail.ru)

Аннотация

Применение стеклометаллокомпозита (СМК) как альтернативного титану материала в построении прочных корпусов глубоководных подводных аппаратов позволит создавать глубоководную технику для работы на любых существующих океанских глубинах. В статье рассмотрено взаимодействия жидкого стекла и поверхности алюминиевой оболочки при изготовлении стеклометаллокомпозитов. Приведены результаты исследования на составах стекол, имеющих различные температуры варки стекла. Проведено исследование условий, обеспечивающих надежное соединение стеклянного слоя с металлической облицовкой, а также исследование физико-химических свойств соединительного слоя. Выполнено сравнение характера диффузионных слоев «стекло–металл» в полученных стеклометаллокомпозитах.

Ключевые слова: стекло, стеклометаллокомпозит, поверхностные микротрещины, диффузия, кристаллизация, прочность, термическая обработка.

CONDITIONS OF GLASS-METAL COMPOSITE FORMATION

Research article

Nagaeva M.V.^{1*}, Goncharuk V.K.²

¹ Far Eastern State Technical Fishery University, Vladivostok, Russian Federation

² Institute of Chemistry of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

* Corresponding author (nagaevamv[at]mail.ru)

Abstract

The use of glass-metal composite (GMC) as an alternative material to titanium in the construction of strong hulls of deep-sea submersibles will make it possible to create deep-sea vehicles for operation at any existing ocean depths. The article examines the interaction of liquid glass and aluminium shell surface during the fabrication of glass-metal composites. The results of research on glass compositions with different glass cooking temperatures are given. The research of conditions providing reliable connection of glass layer with metal cladding, and also research of physical and chemical properties of the connecting layer, is carried out. Comparison of the character of diffusion layers "glass-metal" in the obtained glass-metal composites has been carried out.

Keywords: glass, glass-metal composite, surface microcracks, diffusion, crystallization, strength, heat treatment.

Введение

Главной проблемой при изготовлении подводных аппаратов для использования на глубинах свыше 8000 метров является наличие лишь небольшого числа (ряда) прочных и легких материалов. В основном для этих целей применяется титан и его сплавы, а также дорогостоящие углепластики. Хорошо известно, что по показателям теоретической удельной прочности и цене титан уступает обычному силикатному стеклу: приблизительно в полтора раза по удельной прочности и не менее чем в 50 раз по цене [1], [2]. Высокая природная прочность практически применяемых стекол в отсутствие дефектов подтверждена экспериментально в соответствующих работах [3], [4]. Установлено, что неорганическому стеклу присуща высокая природная прочность независимо от его размеров и фазового состояния (как для стекловолокна, так и для листового или массивного стекла).

Однако эксплуатационная прочность стекла составляет менее 1% от природной прочности стекла. Низкая прочность используемого стекла объясняется ослаблением его структуры из-за наличия в его структуре, и особенно на поверхности, разного рода разупрочняющих дефектов, среди которых наиболее типичными и опасными являются поверхностные микротрещины. Их устранение повышает прочность стекла в сотни раз [5].

Методы и принципы исследования

Авторами многих работ предложены различные методы защиты от микротрещин или их удаления с поверхности стекла. На рисунке 1 приведены основные методы упрочнения стекла и пределы прочности в МПа, достигнутые с их использованием.



Рисунок 1 - Способы упрочнения стекла
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.15.1>

Новый способ существенного повышения прочности стеклянных изделий предложил В. В. Пикуль [6], [7]. Его сущность основана на высокой адгезионной способности стекла к металлам и заключается в предотвращении образования поверхностных микротрещин при формировании (остывании) стеклянного изделия за счет заливки стекломассы в пространство, ограниченное металлическими обшивками. На этом принципе предотвращения поверхностных микротрещин В. В. Пикуль создал новый класс композиционных материалов – стеклометаллокомпозиты (СМК) [8].

В составе СМК стеклянные слои формируются без образования поверхностных микротрещин, а металлические обшивки защищают его от непосредственного взаимодействия с окружающей средой. Освобождение от поверхностных микротрещин придает стеклянным слоям и СМК в целом исключительно высокую прочность и ударную стойкость.

В СМК реализуются все три главных условия обеспечения бездефектной структуры силикатного стекла. Надежно соединенные со стеклянными слоями металлические прослойки и обшивки при остывании, вследствие более высокого коэффициента температурного расширения, сокращают свои размеры более интенсивно, чем стеклянные слои [9]. Тем самым они стягивают поверхности стеклянных слоев, предотвращая появление в них деформаций растяжения и исключая появление поверхностных микротрещин [10]. Обшивки исключают непосредственный контакт стеклянных слоев с внешней средой, изолируя их от воздействия влаги (ОН – групп) и других негативных влияний. Внутренние дефекты исключаются формированием стеклянных слоев под давлением.

Применение СМК как альтернативного материала в построении прочных корпусов глубоководных подводных аппаратов позволит создавать глубоководную технику для работы на любых существующих океанских глубинах при существенном сокращении финансовых затрат. Важной задачей получения СМК является изучение взаимодействия жидкого стекла и поверхности алюминиевой оболочки при заливке расплава в алюминиевую оболочку корпуса.

Основные результаты

В работе исследованы условия образования диффузионного слоя «стекло-алюминий» при получении СМК на основе стекол, имеющих различные температуры варки: тугоплавких составов $54,60\text{SiO}_2-14,08\text{Al}_2\text{O}_3-22,63\text{CaO}-0,59\text{MgO}-3,12\text{B}_2\text{O}_3-3,07\text{Na}_2\text{O}$, $63,50\text{SiO}_2-6\text{Al}_2\text{O}_3-6,40\text{CaO}-2,75\text{MgO}-8,37\text{B}_2\text{O}_3-8,37\text{B}_2\text{O}_3-12,95\text{Na}_2\text{O}$ (температуры варки $1400\dots 1600\text{ }^\circ\text{C}$), среднеплавких $40\text{SiO}_2-10\text{Al}_2\text{O}_3-20\text{Na}_2\text{O}-40\text{B}_2\text{O}_3$ ($1100\dots 1300\text{ }^\circ\text{C}$) и легкоплавких (ниже $1000\text{ }^\circ\text{C}$).

3.1. Исследование границы раздела алюминия и стекла с высокой температурой плавки

Температура варки стекол превышает $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Температуры, при которых осуществлялась их заливка, не опускались ниже $1400\text{ }^\circ\text{C}$.

Высокоплавкие стекла составов $54,60\text{SiO}_2-14,08\text{Al}_2\text{O}_3-22,63\text{CaO}-0,59\text{MgO}-3,12\text{B}_2\text{O}_3-3,07\text{Na}_2\text{O}$, $63,50\text{SiO}_2-6\text{Al}_2\text{O}_3-6,40\text{CaO}-2,75\text{MgO}-8,37\text{B}_2\text{O}_3-8,37\text{B}_2\text{O}_3-12,95\text{Na}_2\text{O}$ заливались в алюминиевую оболочку при температурах более $1400\text{ }^\circ\text{C}$.

Условия проведения первого эксперимента:

- температура заливки стекломассы $1450\text{ }^\circ\text{C}$;
- температура алюминиевой оболочки (изложницы) $150\text{ }^\circ\text{C}$;
- скорость вращения центрифуги составляла 2000 об/мин.

В дальнейших экспериментах менялись температуры алюминиевых оболочек до $300, 450\text{ }^\circ\text{C}$ и скорости вращения центрифуги в диапазоне 3000, 4000, 5000 об/мин.

Скорость охлаждения поддерживалась на уровне $400\text{ }^\circ\text{C}$ в минуту. Тепловое равновесие устанавливалось в районе температур $500\dots 600\text{ }^\circ\text{C}$.

Полученный образец СМК охлаждался до температуры стеклования, отжигался в течение 6 часов. После этого печь отключалась, и в течение 10 часов образец охлаждался в печи до комнатной температуры [11]. Диффузионный слой полученных образцов исследовался различными методами.

Исследованием физического состояния зоны спаивания стекла с алюминием с помощью сканирующего микроскопа выявлено образование диффузионного слоя «алюминий-стекло», вследствие изменения распределения атомов алюминия в поверхностной зоне стекла (рисунок 2).

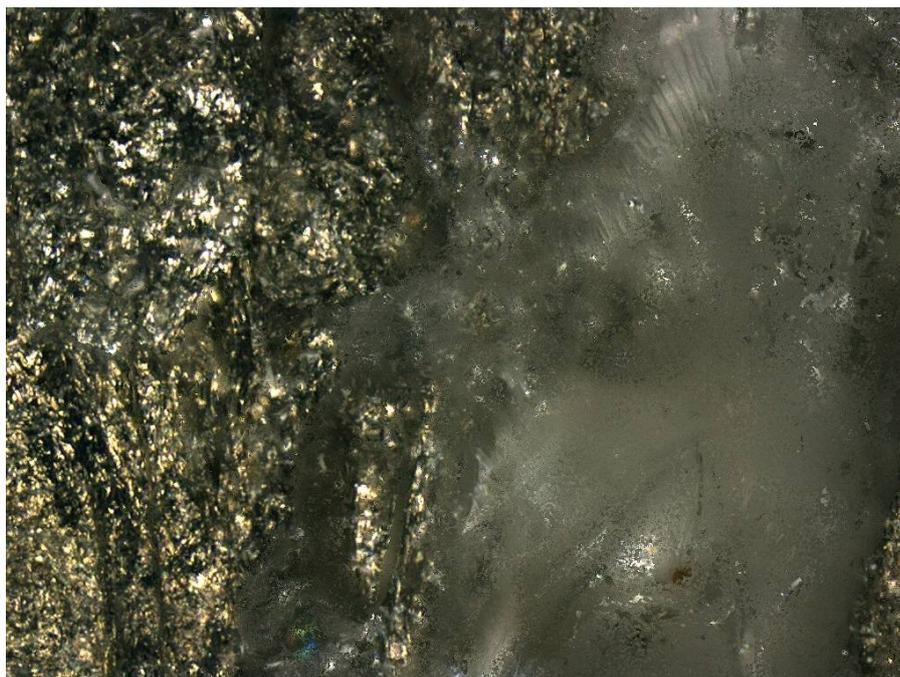


Рисунок 2 - Изображение поверхности алюминия полученного при заливке стекла $54,05\text{SiO}_2-13,04\text{Al}_2\text{O}_3-19,80\text{CaO}-0,36\text{MgO}-7,30\text{B}_2\text{O}_3-2,00\text{Li}_2\text{O}-0,05\text{Na}_2\text{O}$ в алюминиевый корпус при температуре $1450\text{ }^\circ\text{C}$ и скорости центрифуги 2000 об/мин

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.15.2>

При исследовании с помощью оптической микроскопии было выявлено, что при большой скорости вращения центрифуги (5000 об/мин) диффузионный слой получился не ровный и невыраженный, а граница раздела сильно искажена.

Очевидно, что столь жесткие условия получения СМК приводят к некачественному сцеплению стекло–металл. Вместо образования ровного диффузионного слоя с равномерным распределением частиц стекла и алюминия образуются участки с неравномерными напряжениями на стекло, что должно привести к его растрескиванию и резкому уменьшению прочности СМК. Использование корпусов из таких материалов не целесообразно.

Характер диффузионного слоя был исследован с помощью электронной микроскопии. В отличие от оптической микроскопии, позволяющей исследовать довольно большие участки границы раздела, электронная микроскопия проводит точечные измерения глубины диффузионного слоя.

На рисунках 3, 4 приведены типичные электронные изображения участка поверхности алюминия при заливке стеклом при высоких температурах. Видно, что стекло состава $54,05\text{SiO}_2-13,04\text{Al}_2\text{O}_3-19,80\text{CaO}-0,36\text{MgO}-7,30\text{B}_2\text{O}_3-2,00\text{Li}_2\text{O}-0,05\text{Na}_2\text{O}$, залитое при температуре $1450\text{ }^\circ\text{C}$ и скорости центрифуги 2000 об/мин, подплавляет поверхность алюминия и образует диффузионный слой глубиной до 100 мкм.

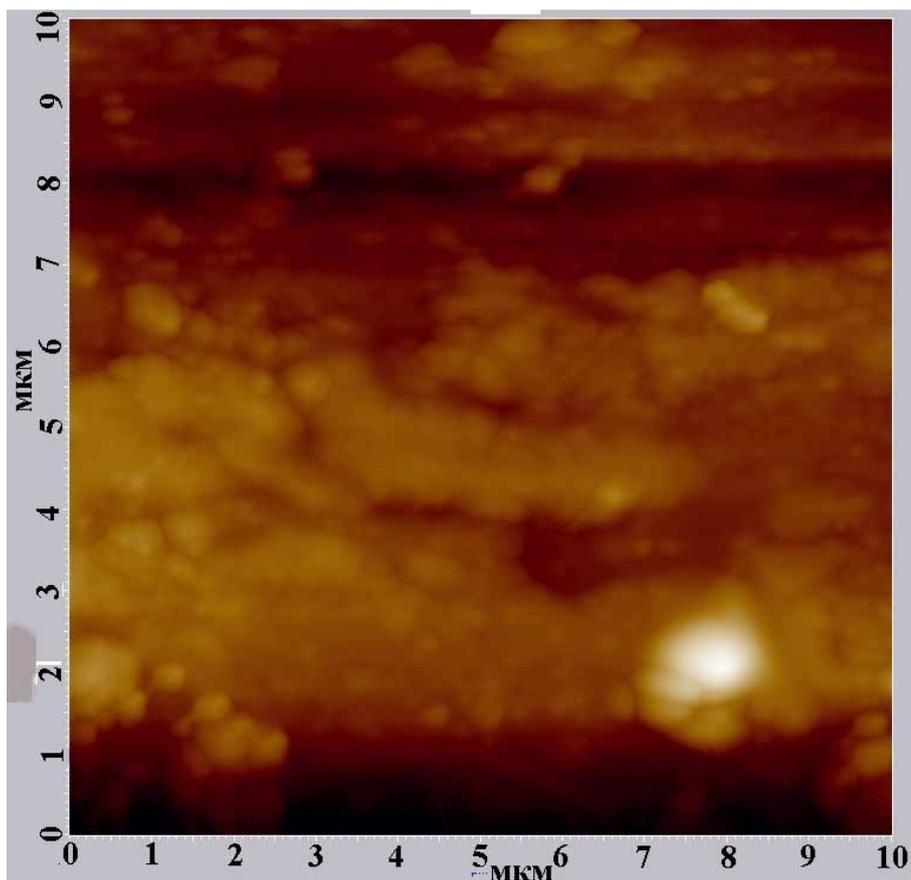


Рисунок 3 - Снимок поверхности алюминиевого корпуса на границе раздела стекло-алюминий, полученного заливкой стекла состава $54,05\text{SiO}_2-13,04\text{Al}_2\text{O}_3-19,80\text{CaO}-0,36\text{MgO}-7,30\text{B}_2\text{O}_3-2,00\text{Li}_2\text{O}-0,05\text{Na}_2\text{O}$ при температуре $1450\text{ }^\circ\text{C}$
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.15.3>

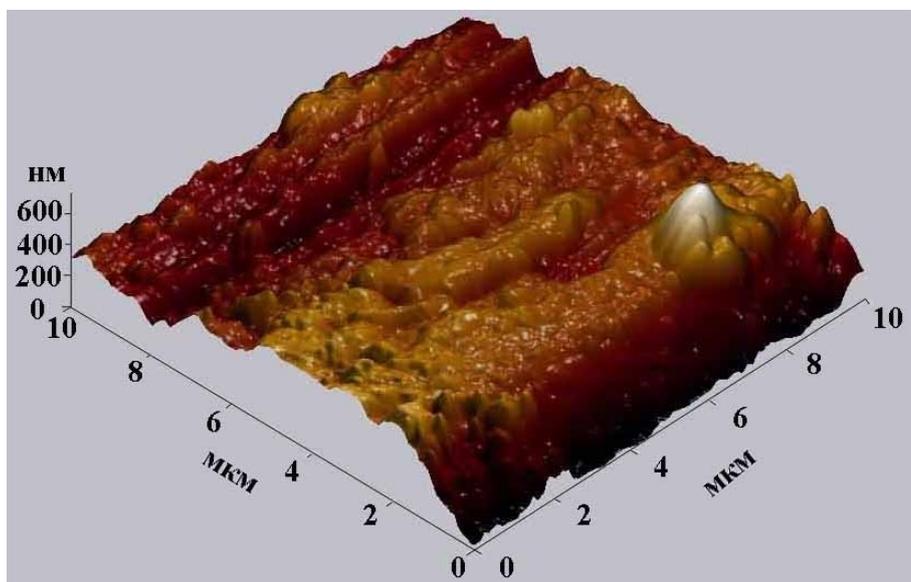


Рисунок 4 - 3D-изображение поверхности алюминия, полученное при обработке снимка
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.15.4>

Далее исследовались зависимости толщин диффузионных слоев от скорости вращения центрифуги и температур алюминиевой оболочки (изложницы) в момент заливки. Температура, при которой заливался расплав, была практически неизменной. Результаты этих исследований приведены на рисунке 5.

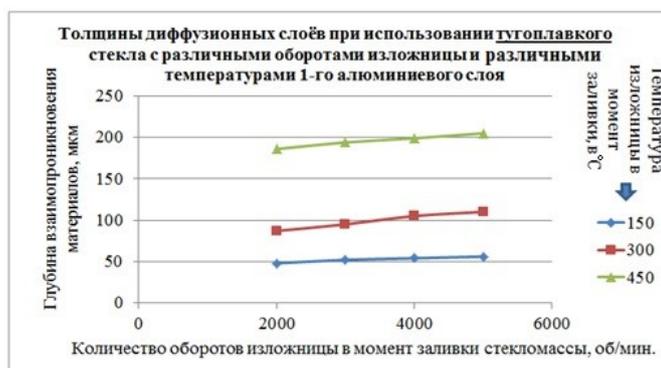


Рисунок 5 - Зависимость толщины диффузионного слоя от скорости вращения и температуры изложницы в момент заливки стекломассы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.15.5>

3.2. Исследование границы раздела алюминия и стекла со средней температурой плавки

В качестве стекла со средней температурой варки (до 1300 °C) и температурой заливки около 1000 °C использовались боратные стекла состава $40\text{SiO}_2\text{-}10\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\text{Na}_2\text{O-}40\text{B}_2\text{O}_3$. Эти стекла выплавлялись в платиновых тиглях при температурах 1200...1250 °C и заливались в кожух корпуса, вращающего со скоростями до 5000 об/мин.

Тепловое равновесие в этих случаях наступает при температурах их стеклования 450...500 °C. Глубина диффузионного слоя, получаемого при этом, варьирует до 150 мкм. Граница «алюминий-среднетемпературное стекло» ровная, и, в отличие от границы «алюминий-высокотемпературное стекло», остается качественной при скоростях вращения 5000 об/мин.

На рисунке 6 приведены результаты исследования толщины слоев среднеплавких стекол от условий их получения.

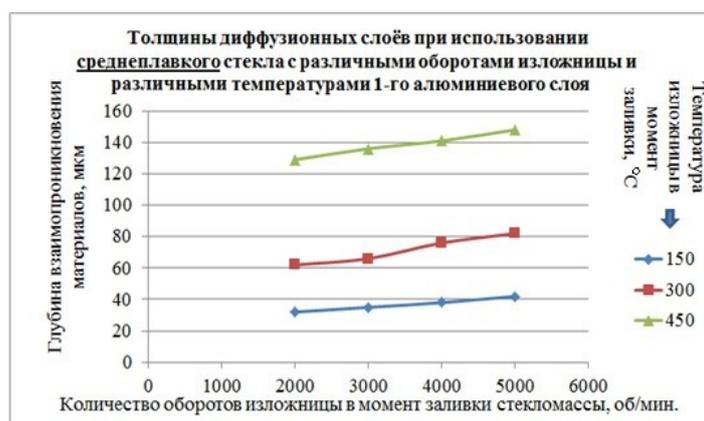


Рисунок 6 - Зависимость толщины диффузионного слоя среднеплавких стекол от условий изготовления образцов СМК

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.15.6>

3.3. Исследование сцепления низкоплавких стекол с алюминием

Проведено исследование условий образования диффузионных слоев «алюминий-низкоплавкое стекло» фторсодержащих алюмоборатных стекол общей формулой $x\text{MgB}_2\text{O}_4\text{-}y\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}z\text{MgF}_2\text{-}h\text{LiF}$, температура плавки которых ниже 1000 °C.

Высокая стойкость к кристаллизации низкоплавких стекол позволяет проводить ступенчатый подъем и снижение температур, исключающих возникновение опасных напряжений в диффузионном слое «алюминий-низкоплавкое стекло».

Интенсивное взаимодействие легкоплавкого стекла с алюминием происходит при температурах от 800 °C до 900 °C.

Взаимодействие при смачивании алюминия расплавом стекла не приводит к образованию новых кристаллических фаз в диффузионных слоях «алюминий-низкоплавкое стекло».

С помощью сканирующего микроскопа выявлено образование диффузионных слоев с толщинами до 90 мкм.

Механизм адгезии и смачивания расплавом стекла алюминия происходит аналогично химическому взаимодействию, которое проявляется в виде «порога смачивания» на зависимости угла смачивания от температуры [12]. Уменьшение угла смачивания наступает в области температур 680...700 °C, в которой угол смачивания изменяется от 70° до 35°.

Введение в состав стекол небольших добавок PbO , PbF_2 , Bi_2O_3 , отличающихся высокой коррозионной активностью к алюминию и снижающих как поверхностное натяжение, так и вязкость расплава стекла, заметно улучшают способность фторсодержащих стеклообразующих расплавов смачивать алюминий.

Повышение прочности соединения достигается после 35...40 минутной выдержки при температуре стеклования стекла.

Введение в состав боратного стекла фторидов до 10 мол. % (MgF_2 , PbF_2 , CdF_2) снижает кристаллизационную способность расплава стекла, увеличивает температурный интервал размягчения, улучшает способность фторсодержащих расплавов смачивать алюминий, и снижает температуру спаивания при высоких значениях микротвердости стекла.

Для получения надежного спая, лишенного внутренних напряжений, за счет образования переходного слоя и исключения вторичного спекания алюминия, термообработку следует вести в течение не менее 6 часов.

На рисунке 7 представлены результаты исследований зависимости толщины диффузионных слоев от условий получения СМК.

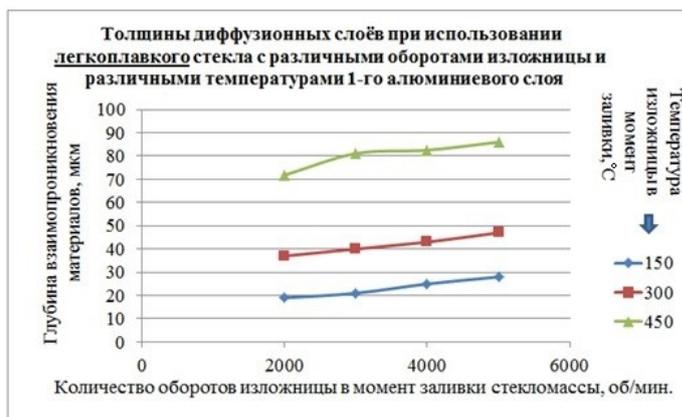


Рисунок 7 - Зависимость толщины диффузионного слоя легкоплавких стекол от условий изготовления образцов СМК
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.15.7>

Заключение

В результате исследования диффузионных слоев «алюминий-стекло» выяснилась устойчивая зависимость ширины и прочности диффузионного слоя от состава стеклянного слоя. Именно состав стекла, а также нюансы технологического процесса определяют все технологические условия изготовления стеклометаллокомпозиата. Ширины диффузионных слоев тугоплавких стекол лежат в пределах от 50 до 200 мкм, для среднеплавких стекол пределы ширины линий ограничиваются размерами от 30 до 150 мкм, для легкоплавких стекол – от 20 до 90 мкм.

Зависимость ширины диффузионных слоев от температуры изложниц в момент заливки стекла также сильно выражена. Для тугоплавкого стекла при температуре изложницы $\approx +150$ °C, ширина диффузионного слоя составляет 50 мкм, а при температуре изложницы $\approx +450$ °C значение ширины диффузионного слоя в четыре раза больше. При этом размеры ширины диффузионных слоев «алюминий–стекло» могут иметь практически равные значения для тугоплавких, среднеплавких и легкоплавких стекол при определенных условиях заливки. Например, диффузионный слой с шириной 80 мкм получается для легкоплавких стекол при температуре изложницы $\approx +450$ °C, а для тугоплавких и среднеплавких стекол при температуре $\approx +300$ °C.

Толщины диффузионного слоя мало зависят от скорости вращения центрифуги, изменяясь в пределах 10...20 мкм при изменении скорости от 2000 до 5000 об/мин для всех составов стекол. Однако качество этого слоя резко ухудшается при увеличении скорости вращения до 5000 об/мин, и при этой скорости вращения приводит к резкому уменьшению прочности СМК, в связи с чем использование корпусов из таких материалов не целесообразно.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Пух В.П. Прочность и разрушение стекла / В.П. Пух. — Ленинград : Наука, 1973. — 155 с.
2. Сильвестрович С.И. Механические свойства стекла / С.И. Сильвестрович // Стекольная промышленность. — 1987. — Вып. 4. — С. 81–90.
3. Байкова Л.Г. Поверхностный слой и высокопрочное состояние листового стекла при воздействии водной среды / Л.Г. Байкова, В.А. Бернштейн, Ф.Ф. Витман // Механические и тепловые свойства и строение неорганических стекол. — Москва : ВНИИЭСМ, 1972. — С. 207–215.

4. Копчекчи Л.Г. Напряжения в стекле в вершинах трещин / Л.Г. Копчекчи, Л.А. Шитова // Стекло и керамика. — 2001. — № 8. — С. 3–5.
5. Пух В.П. Атомная структура и прочность неорганических стекол / В.П. Пух, Л.Г. Байкова, М.Ф. Кириенко [и др.] // Физика твердого тела. — 2005. — Т. 47 — Вып. 5. — С. 850–855.
6. Пикуль В.В. Способ изготовления оболочки прочного корпуса подводного аппарата : пат. 2067060 РФ, МПК51 В63В 3/13 / В.В. Пикуль; заявитель и патентообладатель Пикуль Владимир Васильевич. — № 93056112; заявл. 1993-12-20; опубл. 1996-09-27. — 5 с.
7. Пикуль В.В. Способ изготовления цилиндрической оболочки прочного корпуса подводного аппарата : пат. 2337036 РФ, МПК51 В63В 3/13 / В.В. Пикуль; заявитель и патентообладатель Пикуль Владимир Васильевич. — № 2007113592; заявл. 2007-04-11; опубл. 2008-10-27. — 9 с.
8. Пикуль В.В. К созданию композиционного наноматериала на базе стекла / В.В. Пикуль // Перспективные материалы. — 2008. — № 3. — С. 78–83.
9. Гончарук В.К. Взаимодействие расплава стекла и алюминия при образовании стеклометаллокомпозиата / В.К. Гончарук, М.Н. Мищенко, И.Г. Масленникова [и др.] // Вестник ДВО РАН. — 2018. — № 5. — С. 91–96.
10. Нагаева М.В. Особенности изготовления прочных корпусов подводных аппаратов на основе металлостеклокомпозиата для их использования на различных глубинах мирового океана / М.В. Нагаева, А.А. Ратников, А.А. Карпачев [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — Т. 2. — № 4 (46). — С. 33–38.
11. Гончарук В.К. Зависимость прочности соединения стекло-металл от режимов изготовления стеклометаллокомпозиата / В.К. Гончарук, В.Э. Осуховский, И.Г. Масленникова [и др.] // Химическая технология. — 2019. — Т. 20. — № 14. — С. 683–687.
12. Нагаева М.В. Характер взаимодействия расплава стекла и металла при формировании диффузионных слоев на границе стекло-металл / М.В. Нагаева, В.К. Гончарук, В.В. Бакуев // Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания: материалы 66-ой всероссийской научной конференции, Т. III. — Владивосток : ТОВВМУ им. С.О. Макарова, 2023. — С. 149–158.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Puh V.P. Prochnost' i razrushenie stekla [Strength and destruction of glass] / V.P. Puh. — Leningrad : Nauka, 1973. — 155 p. [in Russian]
2. Sil'vestrovich S.I. Mehanicheskie svojstva stekla [Mechanical properties of glass] / S.I. Sil'vestrovich // Stekol'naja promyshlennost' [Glass industry]. — 1987. — Issue 4. — P. 81–90. [in Russian]
3. Bajkova L.G. Poverhnostnyj sloj i vysokoprochnoe sostojanie listovogo stekla pri vozdejstvii vodnoj sredy [Surface layer and high-strength condition of sheet glass when exposed to aqueous environment] / L.G. Bajkova, V.A. Bernshtejn, F.F. Vitman // Mehanicheskie i teplovyje svojstva i stroenie neorganicheskikh stekol [Mechanical and thermal properties and structure of inorganic glasses]. — Moscow : VNIIESM, 1972. — P. 207–215. [in Russian]
4. Kopchekchi L.G. Naprjazhenija v stekle v vershinah treschin [Stresses in glass at crack tips] / L.G. Kopchekchi, L.A. Shitova // Steklo i keramika [Glass and ceramics]. — 2001. — № 8. — P. 3–5. [in Russian]
5. Puh V.P. Atomnaja struktura i prochnost' neorganicheskikh stekol [Atomic structure and strength of inorganic glasses] / V.P. Puh, L.G. Bajkova, M.F. Kirienko [et al.] // Fizika tverdogo tela [Physics of solid state]. — 2005. — Vol. 47 — Issue 5. — P. 850–855. [in Russian]
6. Pikul V.V. Sposob izgotovlenija obolochki prochnogo korpusa podvodnogo apparata [Method of manufacturing the shell of a durable hull of an underwater vehicle] : pat. 2067060 Russian Federation, МПК51 В63В 3/13 / V.V. Pikul; the applicant and the patentee Pikul Vladimir Vasil'evich. — № 93056112; appl. 1993-12-20; publ. 1996-09-27. — 5 p. [in Russian]
7. Pikul V.V. Sposob izgotovlenija tsilindricheskoj obolochki prochnogo korpusa podvodnogo apparata [Method of manufacturing the cylindrical shell of a durable hull of an underwater vehicle] : pat. 2337036 Russian Federation, МПК51 В63В 3/13 / V.V. Pikul; the applicant and the patentee Pikul Vladimir Vasil'evich. — № 2007113592; appl. 2007-04-11; publ. 2008-10-27. — 9 p. [in Russian]
8. Pikul V.V. K sozdaniju kompozitsionnogo nanomateriala na baze stekla [To the creation of a composite nanomaterial based on glass] / V.V. Pikul // Perspektivnye materialy [Promising materials]. — 2008. — № 3. — P. 78–83. [in Russian]
9. Goncharuk V.K. Vzaimodejstvie rasplava stekla i aljuminija pri obrazovanii steklometallokompozita [Interaction of a glass melt with aluminum during the formation of glass-metal composite] / V.K. Goncharuk, M.N. Mischenko, I.G. Maslennikova [et al.] // Vestnik DVO RAN [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences]. — 2018. — № 5. — P. 91–96. [in Russian]
10. Nagaeva M.V. Osobennosti izgotovlenija prochnyh korpusov podvodnyh apparatov na osnove metallosteklokompozita dlja ih ispol'zovanija na razlichnyh glubinah mirovogo okeana [Features of the manufacture of durable underwater hulls based on metal-glass composite for their use at various depths of the oceans] / M.V. Nagaeva, A.A. Ratnikov, A.A. Karpachev [et al.] // Morskie intellektual'nye tehnologii [Marine smart technologies]. — 2019. — Vol. 2. — № 4 (46). — P. 33–38. [in Russian]
11. Goncharuk V.K. Zavisimost' prochnosti soedinenija steklo-metall ot rezhimov izgotovlenija steklometallokompozita [Dependence of strength of glass-metal bonding on manufacture conditions of glass metal composite] / V.K. Goncharuk, V.E. Oshovskiy, I.G. Maslennikova [et al.] // Himicheskaja tehnologija [Chemical technology]. — 2019. — Vol. 20. — № 14. — P. 683–687. [in Russian]
12. Nagaeva M.V. Harakter vzaimodejstvija rasplava stekla i metalla pri formirovanii diffuzionnyh sloev na granitse steklo-metall [The nature of the interaction of molten glass and metal when forming of diffusion layers at the glass-metal boundary] / M.V. Nagaeva, V.K. Goncharuk, V.V. Bakuev // Fundamental'nye i prikladnye voprosy estestvoznanija

[Fundamental and Applied Issues of Natural Science] : materials of the 66th All-Russian Scientific Conference. — Vladivostok : TOVVMU im. S.O. Makarova, 2023. — P. 149–158. [in Russian]