

К созданию композиционного наноматериала на базе стекла

В. В. Пикуль

Установлено, что в составе стеклометаллокомпозита стеклянный слой приобретает структуру наноматериалов. Это позволяет придать стеклометаллокомпозиту необычайно высокую прочность без привлечения в качестве облицовок высокопрочных металлов. При использовании силикатного стекла и высокодеформативного алюминий-магниевого сплава стеклометаллокомпозит способен придать прочным корпусам глубоководной техники достаточную положительную плавучесть даже на предельных глубинах Мирового океана.

В работе [1] рассмотрен новый композиционный наноматериал на основе стекла — стеклометаллокомпозит, который состоит из стеклянного слоя, заключенного внутри металлических облицовок. Получены четыре патента РФ на способы изготовления различных изделий из стеклометаллокомпозита [2 – 5]. В составе стеклометаллокомпозита стеклянный слой освобождается от поверхностных микродефектов, а металлические облицовки защищают стеклослой от непосредственного взаимодействия с окружающей средой (рисунок). Освобождение от поверхностных микродефектов придает стеклянному слою и стеклометаллокомпозиту в целом исключительно высокую прочность и ударостойкость.

Результаты фундаментальных исследований, выполненных сотрудниками Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН [6], подтверждают возможность придания неорганическому стеклу

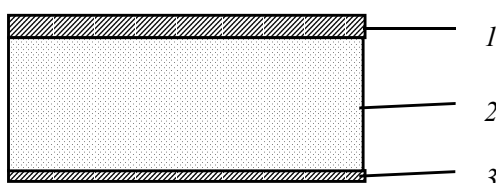


Рисунок Трехслойный стеклометаллокомпозит: 1 — металлическая облицовка; 2 — стеклянный слой; 3 — металлическая облицовка.

необычайно высокой прочности. Установлено, что неорганическому стеклу присуща высокая природная прочность независимо от его размеров: в равной мере, как для стекловолокна, так и для листа или массива стекла. В результате исследования атомной структуры стекла в процессе разрушения сформулированы основные условия, соблюдение которых придает стеклу необычайно высокую прочность. Избавление от поверхностных микродефектов повышает прочность стекла на порядок. Устранение взаимодействия стекла с влагой, содержащейся в воздухе, увеличивает прочность в два раза. Ликвидация внутренних микродефектов повышает прочность стекла на 30%. В результате прочность бездефектного неорганического стекла вплотную приближается к теоретическому уровню [6].

Высокая прочность бездефектного стекла обусловлена особенностями его структуры. Главные элементы структуры силикатных стекол — кремнекислородные тетраэдры. Так, например, у кварцевого стекла в центре тетраэдра расположен атом кремния, который связан с четырьмя атомами кислорода. Соединение соседних тетраэдров происходит через мостиковый кислород, образуя пространственную структуру, в которой элементарные тетраэдры соединяются друг с другом своими вершинами [6]. Поскольку пространственную структуру стекла образуют элементарные тетраэдры, имеющие наноразмеры, то по современной классификации бездефектное силикатное стекло является наноматериалом.

Предложенные нами способы изготовления стекломаталлокомпозита [2–5] не только избавляют стеклянный слой от поверхностных микродефектов и изолируют его от взаимодействия с внешней средой, но и сводят к минимуму, вплоть до полного уничтожения, внутренние микродефекты. Избавление от поверхностных микродефектов происходит за счет уплотнения стекломассы в процессе заполнения пространства между металлическими обшивками и стягивания поверхностей стеклянного слоя при остывании стекломаталлокомпозита. Вследствие того, что коэффициенты температурного расширения у применяемых металлов выше, чем у стекла, в процессе остывания металлические обшивки сокращаются в большей мере, чем стеклянный слой. Это вызывает сжатие поверхностей стеклянного слоя. Тем самым создаются механические препятствия для образования поверхностных микротрещин в стеклянном слое. Вредное воздействие окружающей среды на стеклянный слой ограничивают за счет покрытия всех поверхностей (лицевых и торцевых) металлическими облицовками. Минимум внутренних микродефектов достигается заполнением и формированием стеклянного слоя при повышенном давлении с последующим отжигом стекломаталлокомпозита.

В результате этой обработки, стекло в составе стекломаталлокомпозита приобретает структуру наноматериала, превращая стекломаталлокомпозит в конструкционный композиционный наноматериал. Предложенные способы изготовления стекломаталлокомпозита могут быть положены в основу промышленного производства конструкционных наноматериалов на базе стекла.

Силикатное стекло, состава: $14,5 \text{ MgO} - 14,5 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 71 \text{ SiO}_2$, защищенное от воздействия влаги, содержащейся в воздухе, достигает прочности, равной $10,4 \text{ ГПа}$ [6], что в 10 раз превышает прочность высокопрочного титанового сплава. Плотность силикатного стекла в 1,75 раз ниже, чем у титанового сплава. Хотя модуль нормальной упругости у стекла на 30% меньше, его относительная величина, отнесенная к плотности, выше на 35%. Относительная прочность стекла выше, чем у высокопрочного титанового сплава в 17,5 раз.

Необычайно высокая прочность силикатного стекла позволяет при изготовлении стекломаталлокомпозита отказаться от использования прочностных свойств металлических облицовок, оставив за ними технологическую функцию устранения поверхностных микродефектов в стеклянном слое и его защиту от непосредственного воздействия окружающей среды. Поэтому в качестве облицовок могут

быть использованы легкие металлические сплавы, обладающие достаточной температурой плавления и деформируемостью. К настоящему времени экспериментально установлено, что в процессе изготовления стекломаталлокомпозита облицовки из алюминиевых сплавов надежно соединяются со стеклянным слоем за счет расплавления их поверхности и взаимной диффузии (поверхностная диффузионная сварка), предотвращая образование поверхностных микродефектов в стеклянном слое.

Эффективность практического использования стекломаталлокомпозита показана на примере прочных корпусов глубоководной техники. Отсутствие конструкционных материалов, способных придать прочному корпусу достаточную положительную плавучесть, является главным препятствием на пути полномасштабного освоения глубин Мирового океана. Создание прочных корпусов глубоководной техники из стекломаталлокомпозита может решить эту проблему.

В табл. 1 – 4 приведены расчетные параметры прочных корпусов из стекломаталлокомпозита, состоящего из силикатного стекла ($14,5 \text{ MgO} - 14,5 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 71 \text{ SiO}_2$) и алюминиево-магниевого сплава АМгЗМ. Прочные корпуса представляют собой круговые цилиндрические оболочки с полусферическими оконечностями. Длина цилиндрических оболочек принята равной четырем радиусам срединной поверхности. Рассмотрены оболочки прочного корпуса трех конструктивных оформлений: гладкие (безнаборные), подкрепленные стержневым набором, и двухслойные (сэндвич-конструкции). В качестве единицы измерения линейных размеров принята толщина стеклянного слоя гладкой цилиндрической оболочки h_0 , что позволяет распространить представленные данные на прочные корпуса любых размеров. Толщина металлических облицовок принята равной $0,1 h$, где h — толщина стеклянного слоя рассматриваемой цилиндрической оболочки. Внутренняя металлическая облицовка имеет толщину $0,01 h$. Внешние объемы и массы прочных корпусов представлены в абсолютных (числитель) и относительных (знаменатель) величинах, отнесенных к объему и массе гладких корпусов, соответственно. Для объективности сопоставление прочных корпусов выполнено при их одинаковых внутренних объемах. В табл. 1 и 3 цилиндрические и полусферические оболочки считаются изготовленными из стекломаталлокомпозита. В табл. 2 и 4 стекломаталлокомпозитные цилиндрические оболочки имеют полусферические оконечности из алюминиевого сплава В-95. В табл. 1 и 2 приведены параметры прочных корпусов для работы на глубине

Таблица 1

Основные параметры прочных корпусов из стекломаталлокомпозита для работы на глубине 6000 м

Оболочки прочного корпуса		Параметры цилиндрической оболочки			Внешний объем, h_0^3	Масса, Th_0^3/m^3	Плотность, T/m^3
Цилиндр	Полусфера	Толщина стеклослоя, h_0	Длина, h_0	Внутренний радиус, h_0			
Гладкая	Гладкая	1,0	32,0	7,5	9778,8	5496,2	0,562
Подкрепленная	Гладкая	0,1897	32,0	7,5	8869,3/0,907	3070,6/0,559	0,346
Подкрепленная	Подкрепленная	0,1897	32,0	7,5	8475,1/0,867	2566,7/0,467	0,303
Двухслойная	Гладкая	0,227	32,0	7,5	10876,2/1,112	3428,7/0,624	0,315
Двухслойная	Двухслойная	0,227	32,0	7,5	11220,2/1,147	3021,6/0,550	0,269

Таблица 2

Основные параметры прочных корпусов из стекломаталлокомпозита с полусферическими оконечностями из сплава В-95 для работы на глубине 6000 м

Оболочки прочного корпуса		Параметры цилиндрической оболочки			Внешний объем, h_0^3	Масса, Th_0^3/m^3	Плотность, T/m^3
Цилиндр из стекломаталлокомпозита	Полусфера из сплава В-95	Толщина стеклослоя, h_0	Длина, h_0	Внутренний радиус, h_0			
Гладкая	Гладкая	1,0	32,0	7,5	9902,0	6333,8	0,640
Подкрепленная	Гладкая	0,1897	32,0	7,5	8992,5/0,908	3908,1/0,617	0,435
Двухслойная	Гладкая	0,227	32,0	7,5	10999,3/1,111	4266,3/0,674	0,388

Таблица 3

Основные параметры прочных корпусов из стекломаталлокомпозита для работы на предельных глубинах Мирового океана

Оболочки прочного корпуса		Параметры цилиндрической оболочки			Внешний объем, h_0^3	Масса, Th_0^3/m^3	Плотность, T/m^3
Цилиндр	Полусфера	Толщина стеклослоя, h_0	Длина, h_0	Внутренний радиус, h_0			
Гладкая	Гладкая	1,0	28,0	6,5	6685,3	4285,1	0,641
Подкрепленная	Гладкая	0,277	28,0	6,5	5519,8/0,826	2479,7/0,579	0,449
Подкрепленная	Подкрепленная	0,277	28,0	6,5	5260,6/0,787	2135,3/0,498	0,406
Двухслойная	Гладкая	0,334	28,0	6,5	7339,7/1,098	3166,1/0,739	0,431
Двухслойная	Двухслойная	0,334	28,0	6,5	7967,4/1,192	3040,7/0,710	0,382

Таблица 4

Основные параметры прочных корпусов из стекломаталлокомпозита с полусферическими оконечностями из сплава В-95 для работы на предельных глубинах Мирового океана

Оболочки прочного корпуса		Параметры цилиндрической оболочки			Внешний объем, h_0^3	Масса, Th_0^3/m^3	Плотность, T/m^3
Цилиндр из стекломаталлокомпозита	Полусфера из сплава В-95	Толщина стеклослоя, h_0	Длина, h_0	Внутренний радиус, h_0			
Гладкая	Гладкая	1,0	28,0	6,5	6882,6	5443,8	0,791
Подкрепленная	Гладкая	0,227	28,0	6,5	6243,0/0,907	3872,0/0,711	0,620
Двухслойная	Гладкая	0,334	28,0	6,5	7740,3/1,125	4421,8/0,812	0,571

6000 м, в табл. 3 и 4 — параметры прочных корпусов для работы на предельных глубинах Мирового океана.

На основании расчетных данных, представленных в табл. 1 – 4, следует, что использование в качестве облицовок стекломаталлокомпозита легких металлических сплавов позволит создать прочные корпуса с достаточной положительной плавучестью для всех известных видов подводной техники. Рабочая глубина погружения современной подводной техники может быть доведена до 6000 м, и может быть создана уникальная глубоководная техника, способная

работать на предельных глубинах Мирового океана. Отказ от использования прочностных свойств металлических облицовок и переход на легковесные металлические сплавы повышает надежность соединения металлических облицовок со стеклом за счет перехода от припаивания к диффузионной поверхностной сварке. При этом повышается положительная плавучесть прочных корпусов [7].

Применение стекломаталлокомпозита не ограничивается созданием прочных корпусов глубоководной техники. Его использование может су-

щественно повысить тактико-технические свойства летательных аппаратов и космической техники. Из него могут быть изготовлены резервуары для захоронения радиоактивных отходов, которые защитят окружающую среду вплоть до полного распада радиоактивности. Применение этого материала в трубопроводной технике способно в 5 – 6 раз повысить производительность нефте- и газопроводов. Это далеко не полный перечень эффективности использования стеклометаллокомпозита в технике.

Стеклометаллокомпозит — высокотехнологичный материал. Термопластичность стекла позволяет при переработке заготовок использовать известные технологические операции резки, гибки и сварки. Неограниченные запасы сырья и их дешевизна при наличии развитой промышленности производства стекла и стеклянных изделий создают реальные предпосылки для организации промышленного изготовления высокопрочных конструкций различного назначения из стеклометаллокомпозита.

Существует два способа соединения стекла с металлом: пайка и диффузионная сварка. Исследованы теоретические вопросы формирования стеклометаллокомпозита с позиций механики и теплофизики применительно к первому способу [8]. К настоящему времени появилась возможность не только теоретического, но и экспериментального изучения процессов формирования стеклометаллокомпозита и исследования его механических, тепло-

физических и химических свойств. Для выполнения этих работ Институтом проблем морских технологий ДВО РАН приобретены необходимые оборудование и приборы.

Литература

1. Пикуль В.В. Перспективы создания слоистого композита на основе стекломатериалов. Перспективные материалы, 1999, № 1, с. 61 – 64.
2. Пикуль В.В. Способ изготовления оболочки прочного корпуса глубоководного аппарата. Патент РФ № 2067060, Бюл. изобр., 1996, № 27.
3. Пикуль В.В. Способ получения композиционного изделия. Патент РФ №2196747, Бюл. Изобр., 2003, №2.
4. Пикуль В.В. Способ изготовления композиционного изделия на основе стекла. Патент РФ № 2243900, Бюл. изобр., 2005, №1.
5. Пикуль В.В. Способ изготовления стеклометаллокомпозита. Патент РФ № 2304117, Бюл. изобр., 2007, № 22.
6. Пух В.П., Байкова Л.Г., Кириенко М.Ф. и др. Атомная структура и прочность неорганических стекол. Физика твердого тела, 2005, т. 47, вып. 5, с. 850 – 855.
7. Пикуль В.В. Перспективы создания прочных корпусов глубоководной техники из стеклометаллокомпозита. Судостроение, 2000, №4, с. 14 – 16.
8. Пикуль В.В., Ратников А.А. Математическое моделирование деформирования цилиндрической оболочки из стеклометаллокомпозита в процессе ее изготовления. Перспективные материалы, 2007, №3, с. 10 – 15.

Пикуль Владимир Васильевич — Институт проблем морских технологий ДВО РАН (г. Владивосток), доктор физико-математических наук, профессор, член Российского Национального комитета по теоретической и прикладной механике, заведующий лабораторией. Специалист в области механики оболочек и композиционных материалов.