

**СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА**

**SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY  
OF THE SHIP**

УДК 629.5

DOI: 10.37890/jwt.vi79.497

**Особенности технологии изготовления образцов из  
композитных материалов и некоторые результаты их  
испытаний**

**С.В. Власов<sup>1</sup>**

**К.Е. Хмельницкий<sup>1</sup>**

**А.Р. Рубан<sup>1</sup>**

**В.П. Булгаков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия*

**Аннотация.** В последнее время наблюдается подъем в развитии аддитивных технологий, и инженеры и ученые ищут новые рецептуры, с помощью которых можно строить сравнительно небольшие детали и элементы корпусов. Для строительства объектов целиком, так, например, корпус маломерного судна, а тем более при массовом производстве, требуется соблюдать баланс стоимости, качества, применимости материала, веса и прочностных характеристик. Наиболее распространенный материал в маломерном судостроении последнего времени – это стеклопластик на основе полиэфирных и эпоксидных смол. Данный материал при интенсивном использовании лодки имеет срок службы 15...20 лет, а при надлежащем уходе, этот срок может быть увеличен. Корпуса, выполненные из стеклопластика, обладают необходимыми техническими характеристиками, как при производстве корпусов сложной геометрии, так и в дальнейшей эксплуатации. Уже наблюдаются попытки создания 3D принтеров, в которых в качестве материала для печати, используются полиэфирные смолы, но отрицательной стороной данного оборудования, является то что отсутствует армирование между слоями, из-за чего уменьшается прочность и толщина слоя, что значительно уменьшает скорость печати. На основании наработанного опыта был предложен материал на основе полиэфирной смолы, имеющий в своем составе армирующие волокна, благодаря которым он имеет пастообразную консистенцию и сохраняет форму при нанесении, и не растекаться.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, материал для печати 3D принтером, шумоизоляция, виброизоляция, полиэфирная смола, отвердитель, клей, фибра.

**Technology features of manufacturing samples made of composite  
materials and some of their tests results**

**Sergey V. Vlasov<sup>1</sup>**

**Konstantin E. Khmelnsky<sup>1</sup>**

**Anatoly R. Ruban<sup>1</sup>**

**Vladimir P. Bulgakov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Abstract.** Recently, there has been an upsurge in the development of additive technologies, and engineers and scientists are looking for new formulations with which to build relatively small parts and hull elements. For the construction of large objects entirely, for example, the hull of a small vessel, and even more so in mass production, it is necessary to maintain a balance of cost, quality, applicability of material, weight and strength characteristics. The most common material in small-scale shipbuilding of recent times is fibreglass based on polyester and epoxy resins. This material, with intensive use of the boat, has a service life of 15-20 years, and with proper care, this period can be extended. Cases made of glass-plastic have the necessary technical characteristics, both in the production of cases of complex geometry and in further operation. Attempts have already been made to create 3D printers in which polyester resins are used as a printing material, but the negative side of this equipment is that there is no reinforcement between the layers, which reduces the strength, and the layer thickness, which significantly increases the printing speed. Based on the experience gained, a material based on polyester resin was proposed, which has reinforcing fibres in its composition, thanks to which it has a pasty consistency, and retains its shape when applied and does not spread.

**Keywords:** additive technologies, 3D printer printing material, noise insulation, vibration isolation, polyester resin, glue, fiber.

### **Введение**

В разрабатываемом поисковом исследовании упор делался на создание клеевой пастообразной субстанции, способной при нанесении на плоскость слоя толщиной около 4 мм сохранять самонесущую конструкцию. Получившийся слой должен быть устойчив к весовой нагрузке от накладываемых поверх слоев. В настоящее время создаются уже принтеры для печати полиэфирными смолами без межслойного армирования, вследствие чего уменьшается прочность, также уменьшается и толщина слоя, которая отрицательно влияет на скорость строительства конструкций, в отличие от аналогов, использующих привычный пластиковый материал.[1,2]. Клеевую массу, приготовленную подобным способом, можно также использовать, например, при заполнении трещин корпуса, либо при вакуумном формовании и иных производственных процессах [3,4,5]. При проведении работ нужно учитывать, что процессы желатинизации клеевой основы, наступающие через 10-12 минут после приготовления материала, должны наступать на этапе, когда слой уже наложен и требуется наложить следующий слой. Если необходимо скоростное наложение слоев, то эффект отверждения можно ускорить несколькими способами, например, введением катализаторов отверждения полиэфирной смолы в момент смешивания клея, но тогда сохраняется риск не успеть выработать приготовленный материал, или, например, локальным воздействием ультрафиолетового облучателя на нанесенные слои [6]. Воздействие ультрафиолетовым облучателем показало по прикидочным испытаниям повышенную скорость схватываемости и последующее высыхание клея. Во время пилотного эксперимента, был сделан пастообразный образец материала на основе полиэфирной смолы, на который направили ультрафиолетовый облучатель, предварительно затенив часть образца. Органолептическое исследование образца, показало, что выдержка в течении трех часов под ультрафиолетовым излучателем, дало прочность конструкции образца и отсутствие прилипания к рукам, в то время, как затемненная часть образца, имела признаки невысохшего клея. Данный эксперимент проводился с целью определить, способны ли лучи ультрафиолетового облучателя ускорить затвердевание материала, не смотря на добавку из резиновой крошки, которая препятствует распространению лучей в толщину материала.

### **Приготовление клеевого материала и виды образцов**

Образцы были изготовлены по принципу смешивания полиэфирной марки ПН-1, смолы с отвердителем «бутанокс» с дальнейшим вводом в клеевую массу

армирующих добавок в виде различной фибры, то есть измельченной стеклонити или полимерной нити длиной по 4 мм, диаметром до 12 мкм и наполнителей в виде мелкозернистой резиновой крошки размером до 0,5 мм. Ожидается, что резиновый наполнитель добавленный в виде пластификатора в клеевую массу, может сыграть роль внутреннего виброизолятора, демпфирующего колебательный процесс, при использовании, например, для формирования транцевых досок [7]. В процессе изготовления первой группы образцов использовалась полиэфирная смола, отвердитель и армирование на основе фибры из стекловолокна. Для второй группа образцов использовалась полиэфирная смола, отвердитель и армирование на основе фибры из полимерного волокна. Третья группа образцов состояла из полиэфирной смолы, отвердителя и армирования на основе фибры из стекловолокна с наполнителем из резиновой крошки. Четвертая группа образцов была выполнена из полиэфирной смолы, отвердителя и армирования на основе фибры из полимерного волокна с наполнителем из резиновой крошки. Количество армирующего материала вводилось в соответствии с правилами классификации постройки морских судов Российского морского регистра судоходства.

### Изготовление образцов

При изготовлении образцов для последующих испытаний на статический изгиб, воспользовались лабораторным стендом, который представляет собой несколько ёмкостей, созданных посредством выложенных в прямоугольники металлических полос, закрепленных струбцинами. Разравнивание подготовленной клеевой массы происходило правилом, которое при упоре на борта создают образец необходимой толщины. (рис 1).

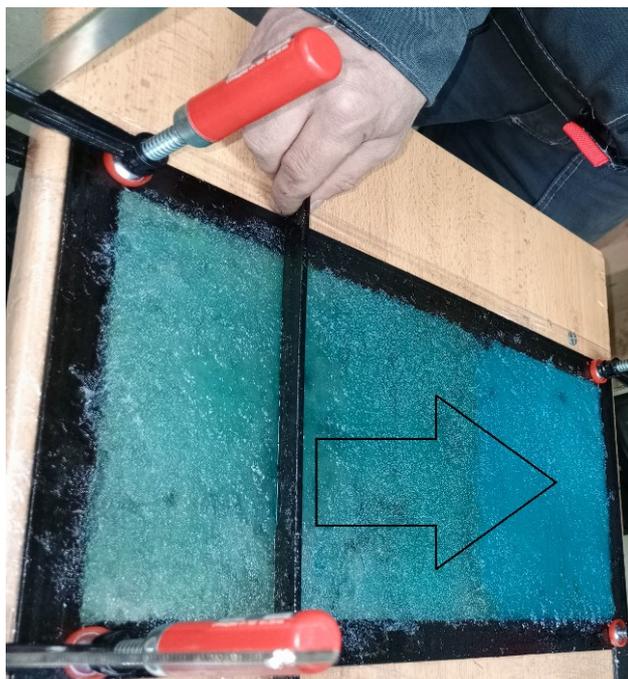


Рис. 1. Формование образцов  
(стрелкой указано направление движения правила)

После полного отверждения заготовок, из них были изготовлены образцы для испытаний путём резки ленточной пилой [8], (рис 2.)



Рисунок 2. Пример подготовки образцов к испытанию

Для испытаний на статический изгиб, образцы изготавливались размером 80×10×4 мм, все образцы были пронумерованы и упакованы для пересылки в лабораторию.

#### **Результаты исследования и сравнение полученных результатов**

Подготовленные образцы были испытаны лабораторией, имеющей признание Российского морского регистра судоходства и Российского Классификационного Общества. Результаты испытаний на статический изгиб, показывают, что наиболее низкое сопротивление материала к упругой деформации показали образцы, состоящие из полиэфирной смолы с армированием на основе фибры из полимера с наполнителем резиновая крошка, приведенные в таблице 1.

*Таблица 1*

**Данные исследования образца из полиэфирной смолы с армированием на основе фибры из полимера с наполнителем резиновая крошка**

Состав образца	Полиэфирная смола с армированием на основе фибры из полимера с наполнителем резиновая крошка.				
	59.5.1	59.5.2	59.5.3	59.5.4	59.5.5
Приложенная сила F, Н	34	39	56	24	58
Высота образца w, м	0,0039	0,0035	0,0042	0,0031	0,0046
Ширина образца h, м	0,0097	0,0097	0,0093	0,0095	0,0097
Прогиб образца u, м	0,0038	0,0053	0,0047	0,0027	0,0046
Расстояние между опорами L, м	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Модуль Юнга E, ГПа	0,165	0,151	0,231	0,219	0,197
Отличие от среднего E, ГПа	0,028	0,042	-0,039	-0,027	-0,004
Отличие от среднего, %	14,45	21,60	20,03	13,82	2,21

Похожий результат у образца на основе полиэфирной смолы с армированием на основе фибры из полимерного волокна, без наполнителя из резиновой крошки, результат незначительно превосходит по показаниям предыдущий образец (см. таблицу 2).

Таблица 2

**Данные исследования образца из полиэфирной смолы с армированием на основе фибры из полимера**

Состав образца	Полиэфирная смола с армированием на основе фибры из полимера.				
	59.9.1	59.9.2	59.9.3	59.9.4	59.9.5
Протокол №2	97	60	82	31	45
Приложенная сила F, Н	0,0047	0,0032	0,0041	0,0032	0,0031
Высота образца w, м	0,0102	0,0105	0,0103	0,0101	0,0108
Ширина образца h, м	0,00525	0,00545	0,00465	0,00315	0,00575
Расстояние между опорами L, м	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Модуль Юнга E, ГПа	0,243	0,195	0,258	0,196	0,131
Отличие от среднего E, ГПа	-0,038	0,010	-0,053	0,009	0,073
Отличие от среднего, %	18,72	4,75	26,15	4,34	35,77

Армирование фиброй из стекловолокна образца имеющего наполнитель из резиновой крошки показывает лучшие прочностные характеристики материала (см. таблицу 3), чем образцы, армированные фиброй из полимера.

Таблица 3

**Данные исследования образца из полиэфирной смолы с армированием на основе фибры из стекловолокна с наполнителем резиновая крошка.**

Состав образца	Полиэфирная смола с армированием на основе фибры из стекловолокна с наполнителем резиновая крошка.				
	59.6.1	59.6.2	59.6.3	59.6.4	59.6.5
Протокол №3	89	61	49	65	46
Приложенная сила F, Н	0,0037	0,0037	0,0028	0,0037	0,004
Высота образца w, м	0,0093	0,0092	0,0098	0,0095	0,0089
Ширина образца h, м	0,0051	0,00375	0,00365	0,00425	0,0025
Расстояние между опорами L, м	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Модуль Юнга E, ГПа	0,384	0,370	0,334	0,316	0,428
Отличие от среднего E, ГПа	-0,018	-0,004	0,032	0,050	-0,061
Отличие от среднего, %	4,90	1,00	8,87	13,75	16,73

Самое большое значение приложенной силы до полного разрушения образца принадлежит материалу, армированному фиброй на основе стекловолокна, данные испытания приведены в таблице 4.

Таблица 4

Данные исследования образца из полиэфирной смолы с армированием на основе фибры из стекловолокна.

Состав образца	Полиэфирная смола с армированием на основе фибры из стекловолокна.				
	59.7.1	59.7.2	59.7.3	59.7.4	59.7.5
Протокол №4	59.7.1	59.7.2	59.7.3	59.7.4	59.7.5
Приложенная сила F, Н	143	130	172	174	133
Высота образца w, м	0,0039	0,0036	0,0046	0,004	0,0043
Ширина образца h, м	0,0101	0,0099	0,01	0,01	0,0101
Прогиб образца u, м	0,0052	0,0052	0,0043	0,00625	0,0046
Расстояние между опорами L, м	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Модуль Юнга E, ГПа	0,449	0,469	0,570	0,456	0,428
Отличие от среднего E, ГПа	0,026	0,005	-0,096	0,018	0,047
Отличие от среднего, %	5,43	1,10	20,16	3,82	9,82

Расчет среднеарифметических значений модуля Юнга, дает нам возможность наглядно сравнить модуль упругости. (рис 3)



Рис. 3. Коэффициент модуля Юнга изготовленных образцов

На рисунке показаны образцы в следующей последовательности:

- образец № 1 – армирование фиброй из полимера с наполнителем резиновая крошка;
- образец № 2 – армирование на основе фибры из полимера;
- образец № 3 – армирование фиброй из стекловолокна с наполнителем резиновая крошка;
- образец № 4 – армирование на основе фибры из стекловолокна.

### **Заключение**

Данные об исследовании образцов, говорят о том, что армирование на основе фибры из стекловолокна, позволяет добиться более упругих конструкций по сравнению с материалами изготовленными на основе фибры из полимера. Использование резиновой крошки в качестве наполнителя значительно снижает коэффициент модуля Юнга готового изделия в обоих случаях, но в случае положительных данных планируемого исследования на виброизоляции и звукоизоляции, данный материал можно использовать, например, в вибро-звукоограждающих конструкциях, где прочностные свойства конструкции менее важны или не регламентируются нормативными документами.

### **Список литературы**

1. PolyJet tm Technology Multi-material 3D printing for full-color, transparency, and flexibility in a single model. Available at: <<https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/>> (accessed 20.04.2024).
2. M.W. Barclift, C.B. Williams. Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing // Department of Mechanical Engineering, Virginia Tech. 2012. pp. 876-890.
3. Петров П.Ю. Преимущества применения полимерных композитных материалов при изготовлении маломерных судов / Морской вестник, №4 (80), 2021. – 11 – 12 с.
4. Цыварев М.В., Ветлугина А.С., Миронов М.Ю. Расчетно-экспериментальная оценка применимости экструдированного пенополистирола бытового назначения в трехслойных конструкциях корпуса маломерного судна / Труды Крыловского государственного научного центра. Т. 4, № 402, 2022. – 75 – 84 с.
5. Цыварев М.В., Ветлугина А.С. Технология изготовления корпуса маломерного судна методами ручной формовки из многослойных композиционных материалов / Труды СПбГМТУ, №1 (5), 2023. – с. 120 – 132.
6. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Особенности отверждения полиэфирного связующего, обусловленные разной длительностью воздействия ультрафиолетового облучения. Пластические массы. 2019;(9-10):27-30. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-9-10-27-30>. (дата обращения 22.04.2024).
7. Соломатов В.И. Вибропоглощающие композиционные материалы / В. И. Соломатов, В. Д. Черкасов, Н. Е. Фомин. - Саранск : Изд-во Морд. ун-та, 2001. - 94, [1] с. : ил., табл.; 20 см.; ISBN 5-7103-0585-5.
8. Алсаид Мазен, Саламех Али. Обоснование применения многослойных композитных материалов в судостроении// Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. №2 с.37-47 DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-37-47.

### **References**

1. PolyJet tm Technology Multi-material 3D printing for full-color, transparency, and flexibility in a single model. Available at: <<https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/>> (accessed 20.04.2024).
2. M.W. Barclift, C.B. Williams. Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing // Department of Mechanical Engineering, Virginia Tech. 2012. pp. 876-890.
3. Petrov P.Yu. Advantages of using polymer composite materials in the manufacture of small vessels / Marine Bulletin, №4 (80), 2021. – 11 – 12 S.
4. Tsyvarev M.V., Vetlugina A.S., Mironov M.Yu. Computational and experimental assessment of the applicability of extruded polystyrene foam for household use in three-layer structures of the hull of a small vessel / Proceedings of the Krylov State Scientific Center. T. 4, № 402, 2022. – 75 – 84 S.
5. Tsyvarev M.V., Vetlugina A.S. Technology of manufacturing the hull of a small-sized vessel using manual molding methods from multilayer composite materials / Proceedings of SPbGMTU, №1 (5), 2023. – pp. 120-132.

6. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Krasheninnikova E.V. Especially-the curing properties of the polyester binder due to the different duration of exposure to ultraviolet radiation. *Plastic masses*. 2019;(9-10):27-30. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-9-10-27-30> (accessed 22.04.2024).
7. Solomatov V.I. *Vibration-absorbing composite materials / V. I. Solo-matov, V. D. Cherkasov, N. E. Fomin.* - Saransk : Publishing House of the Mord. university, 2001. - 94, [1] p. : ill., table.; 20 cm.; ISBN 5-7103-0585-5.
8. Alsaid Mazen, Salameh Ali. Justification of the use of multilayer composite materials in shipbuilding// *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology*. 2019. No.2 pp.37-47 DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-37-47.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Власов Сергей Вячеславович**, аспирант кафедры судостроение и энергетические комплексы морской техники; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; vlas120180@rambler.ru

**Sergey V. Vlasov**, Postgraduate student of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva str., 16; vlas120180@rambler.ru

**Хмельницкий Константин Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации водного транспорта и промышленного рыболовства; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; e-mail: chuchera80@mail.ru

**Konstantin E. Khmelnskiy**, Candidate of Technical Sciences; Docent of the Department of Water Transport Operation and industrial fishing; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, 16 Tatishcheva str.; e-mail: chuchera80@mail.ru

**Рубан Анатолий Рашидович**, кандидат технических наук, профессор кафедры судостроение и энергетические комплексы морской техники; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; a.ruban1974@mail.ru

**Anatoly R. Ruban**, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; 414056, Astrakhan, Tatishcheva str., 16; a.ruban1974@mail.ru

**Булгаков Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор; профессор кафедры судостроение и энергетические комплексы морской техники; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; mbulgak@mail.ru

**Vladimir P. Bulgakov**, Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; 414056, Astrakhan, Tatishcheva str., 16; mbulgak@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.05.2024; опубликована онлайн 20.06.2024.  
Received 01.05.2024; published online 20.06.2024.