

Научная статья

УДК 629.12

DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-111-124

Перспективы использования жесткого поливинилхлорида в малотоннажном судостроении

Дмитрий Александрович Романюта

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

dmitrij.romanyuta@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0828-5990>

Аннотация. В работе исследуется вопрос возможности применения жесткого поливинилхлорида (ПВХ) в качестве основного материала корпусов малотоннажных судов. Представлена статистика применения материалов корпусов маломерных судов. На 2019 г. в России количество судов, изготовленных из полимерных материалов, не превышало 9 %. Из полимерных материалов подробно рассмотрено применение полиэтилена низкого давления (ПНД) и ПВХ. Приведены основные отечественные организации, занимающиеся проектированием и постройкой судов из ПНД, а также примеры их работ. Выполнено сравнение физико-механических характеристик ПНД и жесткого ПВХ. На основании сравнительного анализа показано, что жесткий поливинилхлорид, с точки зрения физико-механических характеристик, во многом лучше, чем полиэтилен низкого давления. Выделены характеристики и свойства жесткого поливинилхлорида, ограничивающие его использование в качестве основного материала корпуса судна. Проведено сравнительное исследование ползучести образцов из жесткого ПВХ и ПНД. Испытания проводились при усилиях, соответствующих растягивающим напряжениям 5–15 МПа. Каждый образец испытывался на протяжении 2 часов. При выбранных расчетных значениях напряжений образцы из ПНД показали ярко выраженную ползучесть в отличие от образцов из жесткого ПВХ. Отмечено, что кривая ползучести образцов из полиэтилена низкого давления имеет ярко выраженную ступенчатую форму. Представлены примеры способов, позволяющих уменьшить токсичность при горении и улучшить сопротивляемость ползучести, устойчивость к ультрафиолетовому излучению (фотодеградацию), ударную прочность и морозостойкость жесткого ПВХ, чтобы расширить возможность применения материала в качестве основного в корпусах малотоннажных судов.

Ключевые слова: ПНД, жесткий ПВХ, ползучесть, сравнение характеристик, полимерные материалы, физико-механические характеристики, испытания.

Благодарности: автор выражает благодарность компании ООО «Калининградский композитный завод» за предоставление материалов для испытаний.

Для цитирования: Романюта Д. А. Перспективы использования жесткого поливинилхлорида в малотоннажном судостроении // Известия КГТУ. 2024. № 73. С. 111-124. DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-111-124.

Original article

Prospects for the use of rigid polyvinyl chloride in small-tonnage shipbuilding

Dmitriy A. Romanyuta

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

dmitrij.romanyuta@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0828-5990>

Abstract. The paper studies the application of rigid polyvinyl chloride (PVC) as the main material of hulls of small vessels. The paper presents the statistics of application of materials of hulls of small vessels. As of 2019, the number of vessels made of polymeric materials in Russia did not exceed 9%. Out of all polymeric materials, the paper considers in detail application of low-pressure polyethylene (LDPE) and PVC is considered. The main domestic organizations engaged in design and construction of HDPE vessels and examples of their works are given. Physical and mechanical characteristics of HDPE and rigid PVC are compared. On the basis of comparative analysis it is shown that rigid PVC is better than low-pressure polyethylene in many respects from the point of view of physical and mechanical characteristics. The characteristics and properties of rigid polyvinylchloride, limiting its use as the main material of the ship hull, are highlighted. A comparative study of creep behavior of rigid PVC and HDPE specimens has been carried out. The tests have been carried out at forces corresponding to tensile stresses of 5–15 MPa. Each sample has been tested for 2 hours. At the selected design stress values, the HDPE specimens showed pronounced creep, in contrast to the rigid PVC specimens. It has been noted that the creep curve of low-pressure polyethylene samples has a pronounced step form. Examples of methods to reduce toxicity in combustion and improve resistance are presented.

Keywords: HDPE, rigid PVC, creep, performance comparison, polymeric materials, physical-mechanical characteristics, tests.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to the company LLC "Kaliningrad Composite Plant" for providing materials for testing.

For citation: Romanyuta D. A. Prospects for the use of rigid polyvinyl chloride in small-tonnage shipbuilding // *Izvestiya KSTU = KSTU News*. 2024;(73): 111-124. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-111-124.

ВВЕДЕНИЕ

Рынок малотоннажных судов в России представлен достаточно обширно, имеются многочисленные компании и предприятия, занимающиеся проектированием и постройкой малотоннажных судов различного типа, класса и назначения, с разнообразием материала корпуса. Так, согласно статистике 2019 г. [1], структура рынка маломерных судов по материалу корпуса в России выглядит следующим образом: стальные суда – 34 %, алюминиевые – 26 %, композитные – 22 %, деревянные – 9 %, прочие – 9 %.

В категории «композитные» учитывались суда с многокомпонентной структурой корпуса – армоцементом, стеклопластиком, углепластиком и т. д.

В категорию «прочие» вошли суда из различных материалов – шпона, полимерных материалов и др. Из полимерных материалов в качестве основного материала корпуса судна широко используется ПНД [2]. Помимо ПНД, среди полимерных материалов применяется ПВХ, однако непластифицированный (жесткий) ПВХ, несмотря на его положительные качества и свойства, в судостроении применения не нашел, причем не только на отечественном, но и на мировом рынке.

Цель данной работы – рассмотреть возможность использования жесткого ПВХ в качестве основного материала корпусов малотоннажных судов.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАЛОТОННАЖНОМ СУДОСТРОЕНИИ

Полиэтилен низкого давления (полиэтилен высокой плотности, ПНД, ПЭВП, (HDPE, LPPE – *англ.*)) – это полимер высокой плотности, получаемый реакцией полимеризации мономера этилена при низком давлении [3]. Листы ПНД производятся методом плоскощелевой экструзии из гранул термопластичного полиэтилена определенной марки или прессованием.

Полиэтилен низкого давления хорошо зарекомендовал себя в судостроении по ряду причин [2–4]: отсутствие коррозии; низкое водопоглощение; высокая удельная прочность; низкая плотность, за счет чего материал имеет положительную плавучесть; высокая механическая сопротивляемость ударам; устойчивость к старению; высокая морозостойкость (до -70°C) и др.

В связи с этим суда из ПНД активно проектируются и строятся по всему миру. Среди отечественных организаций, занимающихся проектированием и строительством таких судов, известны ООО «Арктик-Борт» (катера и лодки длиной от 3,0 до 12,0 м), АО «Риф» (катера и лодки длиной от 3,0 до 19,5 м), АО «ЮжНИИМФ» (катера и лодки длиной от 5,5 до 12,0 м), ООО «ОПТК» (катера и лодки длиной от 4,0 до 6,0 м), ООО «Компания Дизель» (катера длиной от 6,0 до 7,0 м) и др.

Из полиэтилена низкого давления изготавливают как суда с обычными (классическими) корпусами, так и суда-рибы. Суда-рибы из ПНД имеют отличительную особенность – их жесткий корпус и баллон выполнены из самого ПНД, в то время как большинство других компаний производят жесткий корпус из алюминия или стеклопластика, а баллон – из пластифицированного ПВХ [5]. Использование баллона из ПНД обусловлено тем, что полиэтилен низкого давления более устойчив к механическим повреждениям, чем ПВХ. Пример катера-рыба из ПНД длиной 8,5 м от компании «Арктик-Борт» изображен на рис. 1. На рис. 2 представлен проект разъездного судна длиной 12 м от компании АО «ЮжНИИМФ», на рис. 3 – проект катера из ПНД длиной 19,5 м от компании АО «Риф».



Рис. 1. Катер-риб из ПНД длиной 8,5 м
Fig. 1. Rib boat made of HDPE with a length of 8.5 m

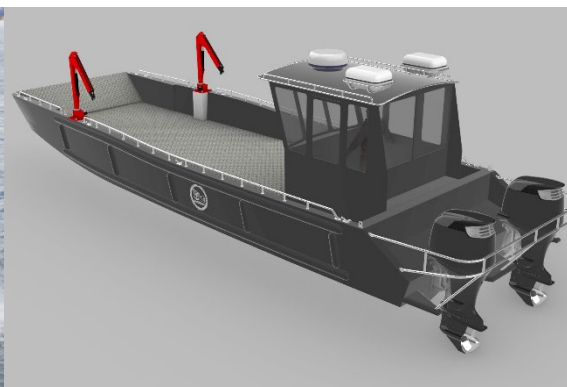


Рис. 2. Проект разъездного судна из ПНД длиной 12,0 м
Fig. 2. Design of a HDPE crew boat with a length of 12.0 m



Рис. 3. Проект катера из ПНД длиной 19,5 м
Fig. 3. Design of a HDPE boat with a length of 19.5 m

Помимо полиэтилена низкого давления, в качестве основного материала корпуса судна может использоваться ПВХ – синтетический термопластичный материал, получаемый реакцией полимеризации мономера винилхлорида [6]. В судостроении нашел активное применение пластифицированный ПВХ, представляющий собой эластичный (мягкий) материал, получаемый в результате полимеризации мономера винилхлорида с определенным пластификатором [7]. Из пластифицированного ПВХ изготавливают надувные лодки, а также надувные баллоны для судов-рибов (как было упомянуто выше). Пример типовой ПВХ лодки изображен на рис. 4.

Помимо пластифицированного ПВХ существует также непластифицированный (жесткий) ПВХ, получаемый в результате полимеризации мономера винилхлорида без применения пластификаторов. Жесткий ПВХ является одним из самых долговечных полимеров при нормальной температуре окружающей среды, из него изготавливают подоконники, оконные рамы, витрины магазинов, мебель, шпунты, корпуса машин и т. д. [8].



Рис. 4. Надувная лодка из ПВХ длиной 2,8 м
Fig. 4. Inflatable PVC boat with a length of 2.8 m

Среди основных преимуществ жесткого ПВХ можно выделить следующие [9, 10]: отсутствие коррозии, низкое водопоглощение, высокая удельная прочность, высокая механическая сопротивляемость ударам, устойчивость к истиранию и т. д.

Преимущества жесткого ПВХ во многом пересекаются с преимуществами ПНД, описанными ранее. В то же время, суда из жесткого ПВХ практически не встречаются, не считая плотов, собранных из поливинилхлоридных труб. Патентный поиск судов с корпусом из жесткого ПВХ также не дал никаких результатов.

СРАВНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНД И ЖЕСТКОГО ПВХ

Чтобы установить причины, по которым жесткий ПВХ не используется в качестве основного материала корпуса судна, необходимо детально рассмотреть его недостатки. Ввиду того, что по свойствам материал похож на полиэтилен низкого давления, было принято решение принять ПНД в качестве «эталона» для сравнения основных свойств и характеристик. Сравнение усредненных характеристик ПНД и жесткого ПВХ представлено в табл. 1. У каждого численного значения в квадратных скобках указана ссылка на источник. Характеристики ПНД приняты для полиэтилена класса ПЭ-100.

Табл. 1. Сравнение усредненных характеристик жесткого ПВХ и ПНД
Table 1. Comparison of the characteristics of rigid PVC and HDPE

Характеристика	Жесткий ПВХ	ПНД
Плотность, г/см ³	1,39 ^[11]	0,958 ^[12]
Водопоглощение, %	0,22 ^[13]	0,113 ^[12]
Твердость по Шору (шкала D)	80,1 ^[11]	62,1 ^[12]
Предел прочности на растяжение, МПа	37,0 ^[11]	26,8 ^[12]
Относительное удлинение при разрыве, %	110 ^[11]	616 ^[12]
Модуль упругости при растяжении, ГПа	2,77 ^[11]	0,991 ^[12]
Предел текучести при изгибе, МПа	80,8 ^[11]	48,7 ^[12]
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2,79 ^[11]	1,19 ^[12]
Ударная вязкость по Шарпи на образце с надрезом, Дж/см ²	0,582 ^[11]	4,43 ^[12]

Коэффициент Пуассона	0,38 ^[14]	0,36 ^[15]
Коэффициент линейного теплового расширения, 1/°С	66,2 ^[11]	116 ^[12]
Температура размягчения по Вика, °С	84,5 ^[11]	116 ^[12]
Температура хрупкости, °С	-12,9 ^[11]	-79,0 ^[12]
Температура плавления, °С	195 ^[11]	213 ^[12]

Анализируя приведенные выше данные можно заключить:

1. Жесткий ПВХ имеет на порядок меньшую характеристику ударной вязкости, чем ПНД. Как следствие, ПНД лучше воспринимает ударные нагрузки, чем жесткий ПВХ;
2. Жесткий ПВХ обладает в два раза большим показателем водопоглощения, чем ПНД, но в абсолютных значениях все равно достаточно низкий;
3. Температура хрупкости жесткого ПВХ существенно выше, чем у ПНД. Это ограничивает условия работы судна из ПВХ в зимнее время;
4. Показатели температуры плавления, температуры размягчения по Вика¹ (температура, при которой стандартный индентор с плоской нижней поверхностью под действием нагрузки проникает в испытуемый образец, нагреваемый с постоянной скоростью, на глубину 1 мм) и плотности жесткого ПВХ также хуже, чем у ПНД, но эти показатели не являются существенно важными при проектировании судна;
5. Все прочие физико-механические характеристики жесткого ПВХ лучше, чем у ПНД.

Также необходимо отметить другие недостатки жесткого ПВХ, не отраженные в табл. 1, а именно ползучесть [16]. При определенных условиях, под воздействием длительной статической нагрузки в материале возникают медленные, но постоянные пластические деформации. Корпус судна, находясь в воде, подвергается длительной статической и переменной динамической нагрузке, поэтому способность сопротивляться ползучести является важным показателем. Данный недостаток свойственен и ПНД, и жесткому ПВХ.

Еще одним недостатком является ультрафиолетовая деградация (фотодеструкция) [17]. Под воздействием ультрафиолетового излучения материал может потерять цвет, потускнеть, растрескаться или даже разрушиться, что свойственно и ПНД, и жесткому ПВХ.

Отрицательным фактором можно назвать токсичность при горении [18]. Жесткий ПВХ не горит и не поддерживает открытого горения, но при нагреве до 100–140 °С материал начинает разлагаться с выделением ядовитых и токсичных веществ.

Обобщая приведенную выше информацию, можно выделить основные направления улучшения жесткого ПВХ для расширения возможности использования его в судостроении в качестве материала корпуса судна:

1. Повышение ударной прочности материала;
2. Повышение устойчивости к УФ-деградации;
3. Понижение температуры хрупкости (увеличение морозостойкости);

¹ ГОСТ 15088-2014. Пластмассы. Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика

4. Уменьшение токсичности при горении;
5. Повышение сопротивляемости ползучести.

ИСПЫТАНИЯ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

Ползучесть свойственна большинству полимерных материалов, и ПНД с жестким ПВХ не являются исключениями. Оценить и сравнить свойства ползучести обоих материалов с помощью открытых источников не удалось. В то же время, как было сказано выше, сопротивляемость ползучести является важным показателем для материала, выступающего основным материалом корпуса судна. В связи с этим было принято решение сравнить характеристики ползучести с помощью непосредственных испытаний в лабораторном комплексе научно-исследовательского центра судостроения (НИЦС) Калининградского государственного технического университета.

Испытания проводились согласно ГОСТ 18197-2014² на образцах, форма и размер которых указаны в ГОСТ 11262-2017³. В качестве материала образцов использовался ПНД, изготовленный из полиэтилена класса ПЭ-100, и жесткий ПВХ, безвозмездно предоставленный компанией ООО «Калининградский композитный завод».

Чертеж типового образца для испытаний представлен на рис. 5. Было изготовлено 5 образцов из каждого материала для испытаний на нагрузки, соответствующие напряжениям 5 МПа, 7,5 МПа, 10 МПа, 12,5 МПа и 15 МПа. По результатам замеров средняя ширина поперечного сечения ПНД-образцов $b = 10,1$ мм, толщина $t = 5,0$ мм. Средняя ширина поперечного сечения ПВХ образцов $b = 10,1$ мм, толщина $t = 5,9$ мм. Длительность испытания для каждого образца при каждой нагрузке – 2 часа.

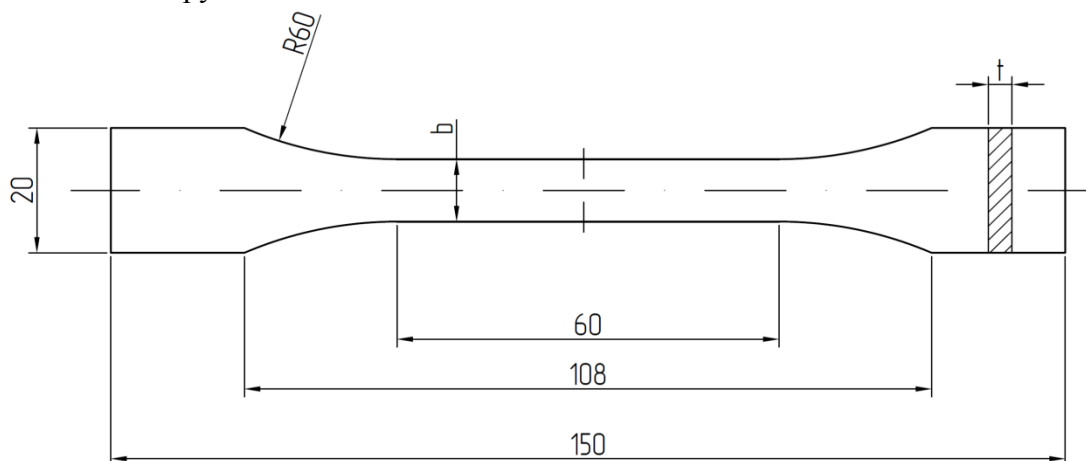


Рис. 5. Форма и размер образца для испытаний на ползучесть
Fig. 5. Shape and size of specimen for creep testing

² ГОСТ 18197-2014. Пластмассы. Метод определения ползучести при растяжении

³ ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Методы испытаний на растяжение



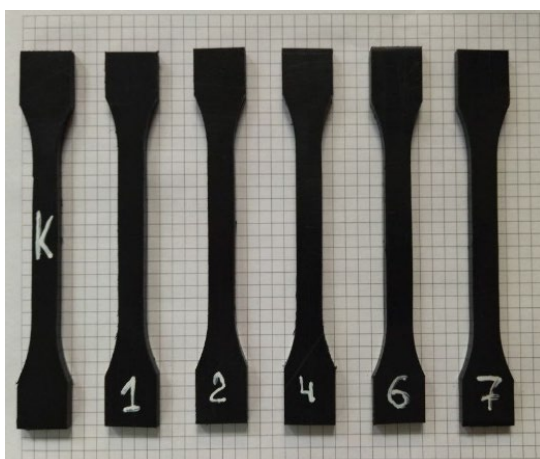
Рис. 6. Стенд для испытаний на ползучесть

Fig. 6. Creep test bench

Стенд для испытаний на ползучесть представлен на рис. 6. Он представляет собой жестко закрепленную консольную балку 1, к которой прикреплен верхний захват 2 для испытаний. На данном захвате размещена верхняя часть датчика перемещений 3. В захват 2 помещается образец 4, на нижнюю часть которого устанавливается нижний захват для испытаний 5. На захвате 5 размещена ответная часть датчика перемещения 3. К нижней части захвата 5 крепится подвес 6, на котором находятся грузы 7, обеспечивающие необходимое усилие для растяжения образца 4. В массу растягивающего усилия включаются массы нижнего захвата 5, подвеса 6, грузов 7 и соответствующей части датчика перемещения 3.

Данные с датчика перемещения поступали на измерительный комплекс «МС-026», фиксирующий значение удлинения образца от времени. Измерительная станция записывала данные с датчика перемещения с частотой 5 Герц, т. е. 5 замеров в секунду. Таким образом, на каждое испытание образца длительностью 2 часа было получено 36 000 значений удлинения.

На рис. 7 (а) представлены образцы из ПНД до испытаний, на рис. 7 (б) – после них. Испытания проводились при температуре 26,5 °С и влажности 32,4 %.



(а)



(б)

Рис. 7. Образцы из ПНД до (а) и после (б) испытаний

Fig. 7. HDPE specimens before (a) and after (b) testing

По результатам испытаний были построены кривые ползучести для каждого образца. Семейство кривых для ПНД-образцов изображено на рис. 8.

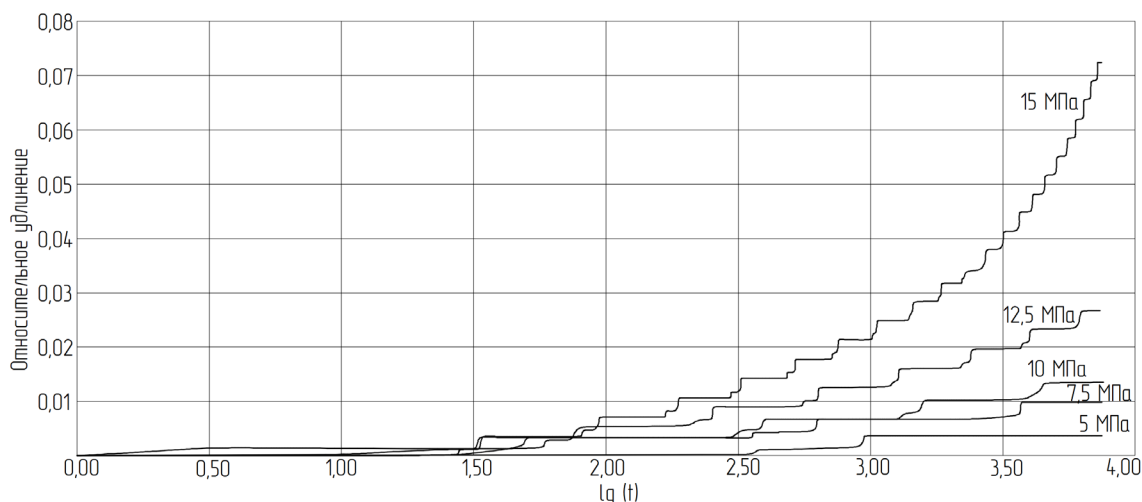


Рис. 8. Кривые ползучести для ПНД-образцов
Fig. 8. Creep curves for HDPE-samples

Следует отметить, что полученные кривые ползучести имеют ярко выраженный ступенчатый характер, причем значения удлинения от времени по каждой кривой записывались в непрерывном режиме, из чего следует, что данный эффект нельзя объяснить дискретностью фиксируемого удлинения. Изучение формы данных кривых с выявлением причин требует дополнительных исследований.

Образцы из жесткого ПВХ были испытаны на той же установке (рис. 6) при нагрузках, соответствующих напряжениям 12,5 МПа и 15 МПа, при этом удлинений за 2 часа практически не наблюдалось (в пределах погрешности измерения датчика перемещения). В связи с этим кривые ползучести по образцам из жесткого ПВХ не представлены.

Таким образом, жесткий ПВХ имеет существенно лучшую сопротивляемость ползучести, чем ПНД. Так, при усилии, соответствующем растягивающему напряжению в 15 МПа, образец из ПНД за 2 часа удлинился на 11 мм, а образец жесткого ПВХ удлинения практически не получил.

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕСТКОГО ПВХ

Повышение ударной прочности и морозостойкости

Известно [19, 20], что повысить ударную прочность жесткого ПВХ можно путем введения в его состав сополимера метилметакрилата с бутадиеном и стиролом или сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом.

Также имеется возможность ввести в состав жесткого ПВХ двойные сополимеры этилена с пропиленом или тройные сополимеры этилена с пропиленом [19]. Данное решение позволяет повысить ударную прочность и морозостойкость, но в то же время у материала снижается теплостойкость и твердость.

В некоторых исследованиях показано [20], что при добавлении в состав хлорированного полиэтилена у итогового изделия также повышаются характеристики ударной прочности и морозостойкости. По мере увеличения содержания хлорированного полиэтилена в составе ударная прочность и морозостойкость жесткого ПВХ растут, но только до определенного уровня.

Повышение устойчивости к УФ-деградации

Данная проблема решается путем добавления в состав исходного материала специальных красителей, наполнителей и поглотителей УФ-излучения [21]. Часто в качестве таких веществ используются бензофенон или бензотриазол. Также в состав исходного материала можно добавить диоксид титана, который зарекомендовал себя как хороший поглотитель УФ-излучения.

Более того, существует целый класс различных светостабилизаторов, совместимых с жестким ПВХ, призванных устранить проблемы УФ-деградации [22].

Уменьшение токсичности при горении

При горении жесткий ПВХ выделяет ряд токсичных веществ, среди которых присутствует монооксид углерода (CO) и хлористый водород (HCl). Для решения данной проблемы в состав ПВХ вносят огнестойкие и дымоподавляющие добавки [23, 24], которые не делают жесткий ПВХ абсолютно безопасным при горении, но увеличивают температуру воспламенения и снижают дымообразование, за счет чего использование этого материала становится более безопасным.

Повышение сопротивляемости ползучести

Несмотря на то, что ползучесть у образцов из жесткого ПВХ не так ярко выражена, как у образцов из ПНД, она все равно присутствует, но только при больших нагрузках, чем рассматривалось выше.

Согласно некоторым исследованиям, введение в состав жесткого ПВХ наполнителя в виде карбоната кальция (CaCO_3) [25, 26] позволяет улучшить характеристики материала в отношении ползучести.

Еще одним возможным решением снижения ползучести материала является армирование его различными волокнистыми материалами (органическими, углеродными, керамическими и т. д.). Имеются исследования, что армирование ПВХ одностенными углеродными нанотрубками позволяет снизить ползучесть материала. Оптимальное количество трубок по массе состава составляет около 1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полимерные материалы (на примере полиэтилена низкого давления или мягкого пластифицированного поливинилхлорида) уже применяются в малотоннажном судостроении в качестве основного материала корпуса судна. Однако жесткий (непластифицированный) поливинилхлорид в настоящее время в судо-

строении не используется, хотя имеет большие перспективы. По сравнению с ПНД жесткий ПВХ уступает по некоторым характеристикам и имеет еще ряд дополнительных существенных недостатков, однако, как показывают многочисленные исследования, все эти недостатки можно решить на стадии создания самого материала путем введения различных добавок и наполнителей.

Таким образом, использование жесткого ПВХ в малотоннажном судостроении в качестве основного материала корпуса судна возможно. Более того, данный материал может показать себя существенно лучше, чем уже хорошо зарекомендовавший себя ПНД, но для окончательного заключения необходимо провести ряд дополнительных исследований и испытаний.

Список источников

1. Анализ рынка маломерных моторных судов. URL: <https://prcs.ru/analytics-article/rynok-malomernyh-motornyh-sudov/> (дата обращения: 08.02.2024).
2. Sözen A. and Neşer G. High density polyethylene (hdpe) as a prominent marine small craft building material: opportunities and obstacles. The 25th symposium on theory and practice of shipbuilding, 2022, pp. 89–90.
3. Полиэтилен высокой плотности (низкого давления) ПНД, HDPE: литьевой I-1561. URL: <https://trade-pioneer.ru/catalog/element.php?ID=62> (дата обращения: 08.02.2024).
4. Why HDPE Boat? URL: http://hdpeboat.com/why_hdpe.aspx (дата обращения: 08.02.2024).
5. Виды и конструкции лодок РИБ. URL: <https://avangard35.ru/vidy-i-konstrukcii-lodok-rib/> (дата обращения: 08.02.2024).
6. Химические свойства и применение поливинилхлорида. URL: <https://polimerinfo.com/polivinilhlorid/polivinilhlorid-chto-eto-takoe.html> (дата обращения: 08.02.2024).
7. Поливинилхлорид (ПВХ): основные свойства, область применения. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/38/> (дата обращения: 08.02.2024).
8. Когда и где используют жесткий ПВХ? URL: <https://andraus.ru/kogda-i-gde-ispolzuyut-zhyostkij-pvh/> (дата обращения: 08.02.2024).
9. Что такое ПВХ? URL: https://www.tbc-empire.ru/faq/faq_pvh/about_pvh/ (дата обращения: 08.02.2024).
10. Что такое ПВХ. Преимущества и недостатки. URL: <https://veka.ua/spravochnik/articles/windows/chto-takoe-pvkh-preimushchestva-i-nedostatki/> (дата обращения: 08.02.2024).
11. Overview of materials for PVC, Rigid Grade. URL: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=69642362cb864d25b8f6eb9d02092ecf (дата обращения: 08.02.2024).
12. Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Extruded. URL: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=482765fad3b443169ec28fb6f9606660> (дата обращения: 08.02.2024).
13. Piyush K. Dutta and Uday Vaidya. A study of the long term applications of vinyl sheet pile. 2003, S. 91

14. Modulus of elasticity and Poisson's coefficient of polymeric materials. URL: <https://www.sonelastic.com/en/fundamentals/tables-of-materials-properties/polymers.html> (дата обращения: 08.02.2024).
15. Nitta Koh-hei and Masahiro Yam. Poisson's Ratio and Mechanical Nonlinearity Under Tensile Deformation in Crystalline Polymers. *Rheology*, 2012, 07 March, pp. 113–132.
16. Rigid PVC Plastic Extrusions. URL: <https://www.intekplastics.com/materials-guide/rigid-pvc/> (дата обращения 17.02.2024).
17. Rigid PVC characteristics & uses. URL: <https://www.pmcplastics.com/resources/engineered-resins/pvc-rigid/> (дата обращения: 17.02.2024).
18. Вреден ли ПВХ? Соответственно, вредна ли террасная доска из ДПК на основе ПВХ? URL: <https://www.savewood.ru/vreden-li-pvh/> (дата обращения: 17.02.2024).
19. Низамов Р. К., Нагуманова Э. И., Абдрахманова Л. А., Хозин В. Г. Поливинилхлоридные материалы, модифицированные термоэластопластами // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2006. № 1 (5). С. 8–11.
20. How to increase the cold resistance of PVC? URL: <http://en.pvcplastics.com.hk/index.php/news/show/aid/177.html> (дата обращения: 24.02.2024).
21. Проблемы при эксплуатации изделий из ПВХ, вызванные воздействием природных факторов. URL: <http://www.engplast.ru/blog.php?b=237> (дата обращения: 24.02.2024).
22. Стабилизаторы, HALS, УФ+ для полимерных материалов. URL: https://chemdirect.ru/polymer_stabilizatory_uv (дата обращения: 24.02.2024).
23. Gianluca Sarti. Developing and improving fire performance and safety in PVC. URL: https://www.researchgate.net/publication/358850647_Developing_and_improving_fire_performance_and_safety_in_PVC (дата обращения: 24.02.2024).
24. Coaker A., William M. Fire and flame retardants for PVC. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2003, no. 9, pp.108–115.
25. Hussain R. K., Dagher H. F., & Khudadad R. R. Reducing Creep Rate of polypropylene's by Soaking Solid solutions of CaCO₃. *World Scientific News*, 2016, 49 (2), pp. 90–103.
26. Chauffoureaux J. C. Mechanical Properties of Rigid Polyvinyl Chloride, Effect of Fillers. *Pure and Applied Chemistry*, 1979, V. 51. N 5, P. 1123–1148.

References

1. Analiz rynku malomernykh motornykh sudov [Analysis of the market for small motor vessels]. Available at: <https://prcs.ru/analytics-article/rynok-malomernykh-motornykh-sudov/> (Accessed 8 February 2024).
2. Sözen A. and Neşer G. High density polyethylene (hdpe) as a prominent marine small craft building material: opportunities and obstacles. *The 25th symposium on theory and practice of shipbuilding*, 2022, pp. 89–90.
3. Полиэтилен высокой плотности (низкого давления) PND, HDPE: лит'евый I-1561 [High density polyethylene (low pressure) HDPE, HDPE: injection molded I-1561].

Available at: <https://trade-pioneer.ru/catalog/element.php?ID=62> (Accessed 8 February 2024).

4. Why HDPE Boat? Available at: http://hdpeboat.com/why_hdpe.aspx (Accessed 8 February 2024).

5. Vidy i konstruksii lodok RIB [Types and designs of RIB boats]. Available at: <https://avangard35.ru/vidy-i-konstrukcii-lodok-rib/> (Accessed 8 February 2024).

6. Khimicheskie svoystva i primeneniye polivinilkhlorda [Chemical properties and applications of polyvinyl chloride]. Available at: <https://polimerinfo.com/polivinilhlord/polivinilhlord-cto-eto-takoe.html> (Accessed 8 February 2024).

7. Polivinilkhlord (PVKH): osnovnye svoystva, oblast' primeneniya [Polyvinyl chloride (PVC): basic properties, scope of application]. Available at: <https://plastinfo.ru/information/articles/38/> (Accessed 8 February 2024).

8. Kogda i gde ispol'zuyut zhestkiy PVKH [When and where is rigid PVC used]? Available at: <https://andraus.ru/kogda-i-gde-ispolzuyut-zhyostkij-pvh/> (Accessed 8 February 2024).

9. Chto takoe PVKH [What is PVC]? Available at: https://www.tbc-empire.ru/faq/faq_pvh/about_pvh/ (Accessed 8 February 2024).

10. Chto takoe PVKH. Preimushchestva i nedostatki [What is PVC. Advantages and disadvantages]. Available at: <https://veka.ua/spravochnik/articles/windows/chto-takoe-pvkh-preimushchestva-i-nyedostatki/> (Accessed 8 February 2024).

11. Overview of materials for PVC, Rigid Grade. Available at: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=69642362cb864d25b8f6eb9d02092ecf (Accessed 8 February 2024).

12. Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Extruded. Available at: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=482765fad3b443169ec28fb6f9606660> (Accessed 8 February 2024).

13. Piyush K. Dutta and Uday Vaidya. A study of the long term applications of vinyl sheet pile. 2003, p. 91

14. Modulus of elasticity and Poisson's coefficient of polymeric materials. Available at: <https://www.sonelastic.com/en/fundamentals/tables-of-materials-properties/polymers.html> (Accessed 8 February 2024).

15. Nitta Koh-hei, and Masahiro Yam. Poisson's Ratio and Mechanical Nonlinearity Under Tensile Deformation in Crystalline Polymers. *Rheology*, 2012, 07 March, pp. 113–132.

16. Rigid PVC Plastic Extrusions. Available at: <https://www.intekplastics.com/materials-guide/rigid-pvc/> (Accessed 17 February 2024).

17. Rigid PVC characteristics & uses. Available at: <https://www.pmcplastics.com/resources/engineered-resins/pvc-rigid/> (Accessed 17 February 2024).

18. Vreden li PVKH? Sootvetstvenno, vredna li terrasnyaya doska iz DPK na osnove PVKH [Is PVC harmful? Accordingly, is PVC-based WPC decking board harmful?]? Available at: <https://www.savewood.ru/vreden-li-pvh/> (Accessed 17 February 2024).

19. Nizamov R. K., Nagumanova E. I., Abdrakhmanova L. A., Khozin V. G. Polivinilkhlordnyye materialy, modifitsirovannyye termoelastoplastami [Polyvinyl chloride

materials modified with thermoplastic elastomers]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2006, № 1 (5), pp. 8–11.

20. How to increase the cold resistance of PVC? Available at: <http://en.pvcplastics.com.hk/index.php/news/show/aid/177.html> (Accessed 24 February 2024).

21. Problemy pri ekspluatatsii izdeliy iz PVKH, vyzvannye vozdeystviem prirodnykh faktorov [Problems in the operation of PVC products caused by exposure to natural factors]. Available at: <http://www.engplast.ru/blog.php?b=237> (Accessed 24 February 2024).

22. Stabilizatory, HALS, UF+ dlya polimernykh materialov [Stabilizers, HALS, UV+ for polymer materials]. Available at: https://chemdirect.ru/polymer_stabilizatory_uv (Accessed 24 February 2024).

23. Gianluca Sarti. Developing and improving fire performance and safety in PVC. Available at: https://www.researchgate.net/publication/358850647_Developing_and_improving_fire_performance_and_safety_in_PVC (Accessed 24 February 2024).

24. Coaker A., William M. Fire and flame retardants for PVC. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2003, no. 9, pp.108–115.

25. Hussain R. K., Dagher H. F., & Khudadad R. R. Reducing Creep Rate of polypropylene's by Soaking Solid solutions of CaCO₃. *World Scientific News*, 2016, 49(2), pp. 90–103.

26. Chauffoureaux J. C. Mechanical Properties of Rigid Polyvinyl Chloride, Effect of Fillers. *Pure and Applied Chemistry*, 1979, vol. 51, no. 5, pp. 1123–1148.

Информация об авторе

Д. А. Романюта – главный конструктор конструкторского бюро Научно-исследовательского центра судостроения, аспирант кафедры судостроения, судоперемонта и морской техники

Information about the author

D. A. Romanyuta – chief designer of the design bureau of the shipbuilding research center, graduate student of the department of Shipbuilding, ship repair and marine technology

Статья поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 16.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 15.04.2024; approved after reviewing 16.04.2024; accepted for publication 17.04.2024.