

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-75-84
УДК 629.5.015.4:629.5.023+620.168.3

М.В. Цыварев, А.С. Ветлугина, М.Ю. Миронов
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ЭКСТРУДИРОВАННОГО ПЕНОПОЛИСТИРОЛА БЫТОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ КОРПУСА МАЛОМЕРНОГО СУДНА

Объект и цель научной работы. Статья посвящена комплексному исследованию возможности применения экструдированного пенополистирола (ЭПС, XPS) в композитных трехслойных сэндвич-структурах для корпусов маломерных судов.

Материалы и методы. Для определения механических свойств композиционного материала (КМ) и его составляющих используются экспериментальные методы испытания на трехточечный изгиб, на продольное растяжение и сжатие. Для оценок упругих и предельных характеристик применяются балочная теория и смесевая модель слоистой балки, метод конечных элементов, а также метод решения геометрически нелинейных контактных задач на основе шаговой процедуры Ньютона – Рафсона.

Основные результаты. Приведены полученные диаграммы силовых реакций исследуемых композитных балок, заполнителя, связующего в зависимости от заданного перемещения оснастки испытательного оборудования. Получены оценки эквивалентных модулей упругости, а также предварительное положительное заключение о возможности применения трехслойного композитного материала на основе экструдированного пенополистирола в маломерном судостроении как заменителя традиционных КМ на основе деревянного шпона. Подобраны параметры конструктивно-подобной конечно-элементной идеализации для прогнозных расчетов сложных крупногабаритных конструкций, испытания которых возможны лишь при полном изготовлении корпуса.

Закключение. Поставлена и решена задача об определении упругих свойств для исследуемых сэндвич-панелей на основе ЭПС. Полученные величины дают представление о применимости данного КМ в судостроении.

Ключевые слова: маломерное судно, условия прочности и жесткости, композитная сэндвич-панель, экструдированный пенополистирол, трехточечный изгиб, эквивалентные модули, метод конечных элементов, контактная задача.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-75-84
UDC 629.5.015.4:629.5.023+620.168.3

M.V. Tsyvarev, A.S. Vetlugina, M.Yu. Mironov
St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF HOUSEHOLD EXTRUDED POLYSTYRENE FOAM (XPS) PRACTICABILITY FOR SANDWICH HULL PANELS OF SMALL CRAFT

Object and purpose of research. This paper is an integrated study of extruded polystyrene foam (XPS) practicability for three-layered composite hull structures of small craft.

Для цитирования: 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. 2022; 4(402): 75–84.

For citations: Tsyvarev M.V., Vetlugina A.S., Mironov M.Yu. Analytical and experimental assessment of household extruded polystyrene foam (XPS) practicability for sandwich hull panels of small craft. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 4(402): 75–84 (in Russian).

Materials and methods. Mechanical properties of composite materials and their components are determined experimentally (three-point bending, longitudinal tension/compression). Elastic properties and limit-state characteristics are obtained from beam theory, mixed model of composite beam, finite-element method, as well as solution of geometrically non-linear contact problems as per Newton-Raphson iterative technique.

Main results. The study illustrates final diagrams for structural responses of investigated composite beam, filler and binder as functions of pre-defined displacement of test rigging. It also gives the estimates for equivalent Young's moduli, as well as preliminary positive opinion about the practicability of XPS as a substitute for the conventional wood veneer in composite structures of small ships. The paper also presents a structurally similar FE model suitable for prediction calculations of large complex structures that can be tested only when the whole full-scale hull is available.

Conclusion. This study formulates and solves the elastic problem for the investigated XPS-based sandwich panels. The results give an idea about the practicability of this material for shipbuilding applications.

Keywords: small craft, strength and stiffness conditions, composite sandwich panels, extruded polystyrene foam, three-point bending, equivalent moduli, FE method, contact problem.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В настоящее время с учетом необходимости восстановления, поддержания и развития материально-технической базы системы профориентации морских профессий инициативное КБ факультета кораблестроения и океанотехники СПбГМТУ (ИКБ) ведет разработку т.н. кадетской шлюпки, которую легко было бы распространить среди учебных заведений, клубов юных моряков, организаций наподобие ДОСААФ. Данное судно должно быть легким в постройке, при этом мореходным, удобным и безопасным для обучения подростков.

Авторы проанализировали с позиций вместимости, остойчивости, ходкости, массы корпуса, удоб-

ства транспортировки и иных проектных качеств проекты гребно-парусных лодок с габаритами длин в диапазоне от 5,3 м до 6 м и ширины от 1,6 м до 1,8 м: российский «Ял-4» в деревянном и стеклопластиковом корпусах, лодка разведки Нидерландов Lelievlet, английская шлюпка Trinity 500 гребного клуба The Cornish Pilot Gig Association, тренировочная клинкерная шлюпка для обучения курсантов ВМФ Западной Австралии Kernic, проекты фанерных гребно-парусных лодок ИКБ «Весла», «Анна», «Секционная» и др. [1]. На основе предпроектных исследований группы прототипов разработаны требования к кадетскому судну и на их основе получены теоретический чертеж и эскиз конструкции корпуса (рис. 1).

Сегодня большую часть мирового малотоннажного спортивно-туристского флота составляют

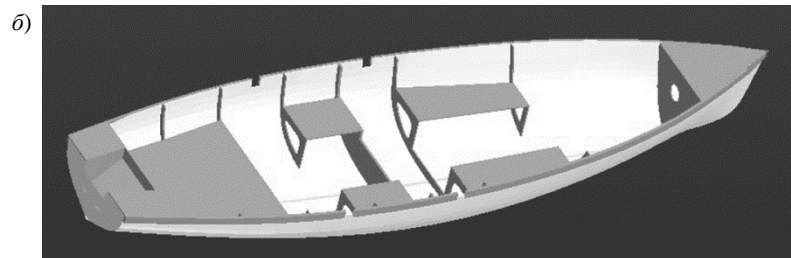
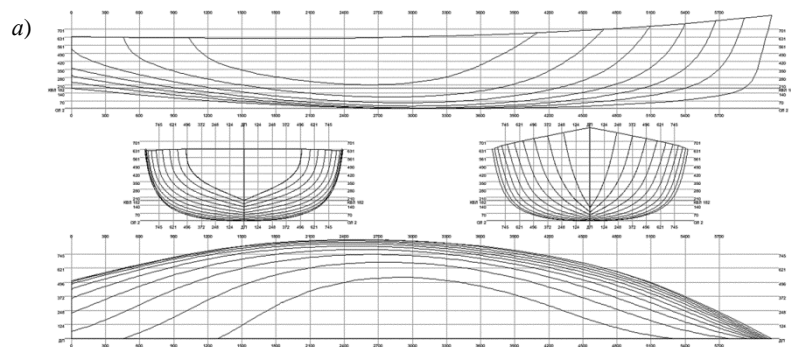


Рис. 1. Теоретический чертеж (а) и геометрическая 3D-модель (б) проектируемого маломерного судна

Fig. 1. Lines drawing (a) and geometric FE model (b) of the boat under design

суда, имеющие корпуса из неметаллических композиционных материалов. Основной проблемой применения таких судов можно назвать разрозненность информации и неконкретность данных об их механических свойствах, из-за чего не представляется возможным точно оценить прочностные свойства создаваемых из них конструкций. Правила РМРС [2], DNV-GL [3], стандарты ISO [4, 5] по маломерным судам дают ответы на отдельные вопросы о нормировании нагрузок и прочности вполне конкретных, широко используемых для рыболовных судов или яхт материалов. Вопросы же обеспечения прочности спортивно-туристских и учебных маломерных судов из КМ подробно не освещены, базируются на большом опыте, собранном в журнальных материалах или отдельных монографиях [6], зачастую прочность и вовсе считается заведомо обеспеченной и избыточной, в силу малости корпуса и превалировании местной прочности над общей.

Одним из природных композитных материалов, который на данный момент широко применяется в маломерном судостроении, является древесно-слоистая плита (фанера), имеющая хорошие показатели по прочности и жесткости для создаваемых из нее конструкций, отличную технологичность, ремонтпригодность. Однако данный КМ обладает рядом недостатков, таких как:

- невозможность создания с его помощью криволинейных обводов корпуса из-за сложности погоби листов (предпочтительны «развертываемые» поверхности);
- высокий удельный вес корпусных конструкций при сочетании их с защитными или подкрепляющими слоями полимерных материалов;
- гниение древесных прослоек из-за создания под слоем ЛКП благоприятного микроклимата для бактерий при регулярной эксплуатации судна, а также серьезная зависимость состояния фанерных корпусов от влажности и температуры и их недолговечность.

В основе большинства современных корпусов катеров, яхт, шлюпок – монолитные стекло- и углепластиковые пакеты на базе ткани или мата, реже – трехслойные конструкции (ТК) с легким наполнителем [3, 6, 8]. Преимуществами ТК или сэндвича являются малая масса и высокая общая жесткость оболочечной конструкции за счет разнесения жестких слоев на значительное расстояние. При этом для местной прочности и жесткости, особенно ударной, преимущества ТК перед монолитом очевидны, а часто и отсутствуют. В качестве легко-

го разносящего слоя используют специализированные пенопласты повышенной жесткости, которая достигается в случае открытоячейстой структуры наполнителя за счет пропитки связующим, а в случае закрытоячейстой структуры – за счет химического состава.

Стоимость сортов фанеры, пригодных для судостроения, сейчас весьма высока, число предложений на отечественном рынке снижается. Монолитная конструкция из стеклопластика при сопоставимых с деревянными конструкциями жесткостях лишается преимуществ по массе, а углепластиковые конструкции оказываются весьма дороги, требуя также специфичных условий формования и особых видов связующего. Задаваясь целью создания дешевого и легкого корпуса с достаточной прочностью и жесткостью, мы неминуемо приходим к трехслойной конструкции.

В ряде проектов яхтенных корпусов на основе сэндвича предполагается нанесение наполнителя в виде пены с практически параллельным применением вакуумного формования обечаек. Гарантированную герметичность и высокую прочность ТК дают проникаемые пенопласты, однако становится необходимым применение вакуумной инфузии, резко возрастает количество связующего, снижая выигрш в массе по сравнению с тканевым ламинатом. Применяемые при этом техпроцессы ориентированы на специфичное оборудование и дают снижение себестоимости лишь для крупной серии изделий. Единичное изготовление или малые серии желательно ориентировать на контактное формование, в крайнем случае – на поверхностно-вакуумное.

Отечественная промышленность вполне обеспечивает судостроителей маломерной морской техники армирующими материалами и частично – полимерными смолами. Однако для наполнителей обычно используют материалы зарубежного производства, с высокой стоимостью.

При этом достаточно широко развито и в РФ, и в ближнем зарубежье производство используемого в качестве тепло- и влагоизолятора экструдированного пенополистирола [7]. Это закрытоячейстый пенопласт, практически влагонепроницаемый, обладающий низкой плотностью и, как представляется, невысокой, но достаточной жесткостью для попыток использования его в создании лодочных корпусов (уступает широко используемому закрытоячейстому ПВХ-пенопласту типа Divinycell в 3–5 раз). Кроме того, он отличается хорошими

адгезионными свойствами с полимерными смолами, отличной обрабатываемостью режущим и абразивным инструментом.

Изготовление ЭПС в листовой форме предусматривает ряд удобных размеров по толщине (10, 20, 30, 50, 100 мм) и приемлемые для формирования выкладок габариты листов (1200×600 мм). Формирование, например, квазиклинкерной обшивки корпуса маломерного судна полосовыми призматическими фрагментами ЭПС допускает низкий процент пустот даже в сэндвиче со сложной формой сечения. Приемы локального подкрепления ТК в виде проставок из чистого связующего или стеклопластика, нарабатанные строителями маломерных судов, выглядят применительно к ЭПС многообещающими. Наконец, стоимость ЭПС низка, а рыночное предложение практически неограниченно. Очевидно, что низкая физическая жесткость заполнителя из ЭПС должна потребовать повышенных толщин ТК и при этом – увеличения влияния поперечных сдвигов.

Общими проблемами применения существенно разномодульных материалов в ТК являются:

- низкая жесткость и прочность при интенсивных локальных воздействиях;
- обеспечение адгезионной прочности несущих слоев и заполнителя;
- обеспечение устойчивости обечаек на мягком основании при сжатии, сдвиге и кручении;
- обеспечение усталостной прочности заполнителя.

Целью настоящей работы и последующих исследовательских работ ИКБ является установление принципиальной применимости сэндвич-панелей толщиной от 20 мм из ЭПС и стеклопластиковых обечаек для строительства лодочных корпусов с необходимой жесткостью и прочностью. Опыт успешной постройки и эксплуатации близких по характеристикам проектов из фанеры предполагает, что цель в значительной степени достигается, если ТК демонстрирует прочность и жесткость, сопоставимые с характеристиками хвойной фанеры сорта 1–2 толщиной 6–6,5 мм. Ожидаемый выигрыш массы при этом, с учетом изменяемой конструкции подкреплений, – до 50 %.

Для достижения цели следует решить задачи по экспериментальному определению упругих и неупругих свойств трехслойных пакетов и их составляющих, а также по настройке максимально подробной и пригодной в дальнейшем для численных исследований всего корпуса конечно-элементной модели.

Экспериментальное исследование поведения трехслойных образцов и их составляющих

Experimental study on the behavior of three-layered specimens and their components

В качестве составляющих для создания ТК используются:

- два варианта листового ЭПС отечественного производства – с использованием угольного порошка («Технониколь XPS Carbon») и без («Техноплекс»), толщиной 20 мм, близкие по стоимости и плотности, условно называемые здесь ЭПС-1 и ЭПС-2;
- мультиаксиальная (квадраксиальная) отечественная стеклоткань типа «Арматон» (0/90/45/-45) толщиной 1 мм, позволяющая обеспечить создание обечаек высокой жесткости за счет лишь одного слоя, что является определяющим при контактном формовании; сразу дающая квазиизотропные свойства слоя;
- связующее на основе отечественной эпоксидной смолы «Эповин» холодного отверждения.

Для подробного исследования упругих и предельных свойств отдельных составляющих трехслойной панели и готовой трехслойной панели авторы изготовили несколько серий образцов (рис. 2):

- образцы трехслойные призматические из ЭПС и стеклопластика размером 435×55×20...22 мм;
- образцы стеклопластиковые полосовые 150×36×1,01...1,25 мм;
- образцы призматические материала заполнителя (ЭПС) 150×55×18...20 мм;
- образцы призматические материала связующего (смола отвержденная) 100×9×9 мм;
- образцы трехслойные цилиндрические из ЭПС и стеклопластика Ø100×20...22 мм;
- образцы фанеры хвойной трехслойные с продольной и поперечной ориентацией наружных слоев шпона размером 400×55×6,5 мм.

В силу ручного изготовления объектов для испытаний имелся большой разброс как по конечным размерам изделий, так и по полученным свойствам, что отразилось на результирующих диаграммах. Однако повторяемость результатов в целом следует признать удовлетворительной.

В качестве основного силового оборудования использовалась универсальная цифровая испытательная машина продольного нагружения серии МИМ-5.1.1-3.4 с максимальным усилием 5 кН, оснащенная устройствами для выполнения испытаний на растяжение, сжатие (в т.ч. с ин-

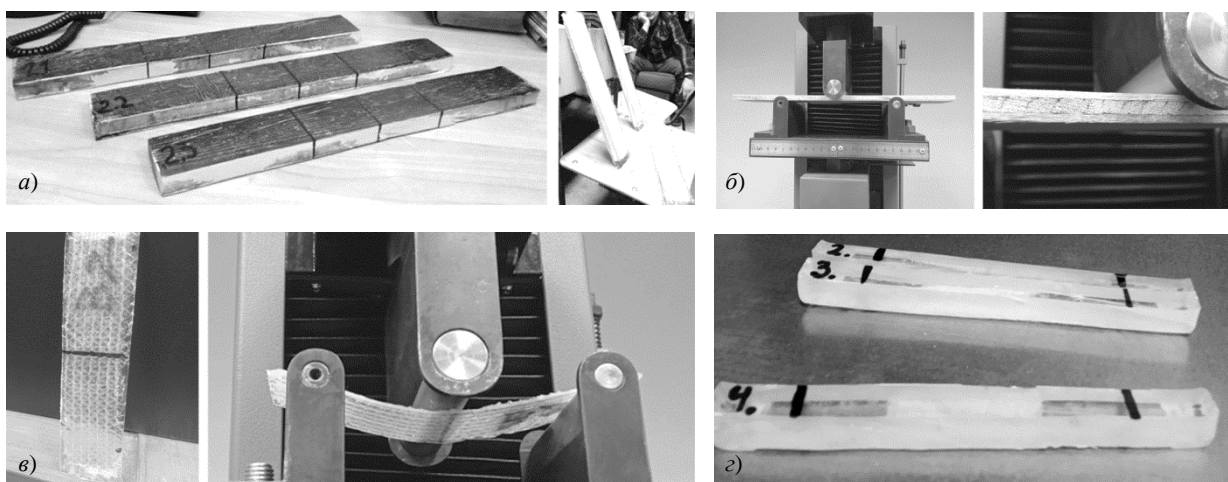


Рис. 2. Виды образцов для испытаний: а) сэндвич-панели; б) фанерные; в) монослой стеклопластика; г) связующее

Fig. 2. Types of specimens: a) sandwich panels; b) plywood; c) GRP monolayer; d) binder

денцией) и на трехточечный изгиб (опоры с базой до 200 мм + нож).

Проводились следующие виды испытаний (рис. 3):

- трехточечный изгиб на базе 100-мм образцов ЭПС;
- трехточечный изгиб на базе 100-мм образцов стеклопластика;
- трехточечный изгиб на базе 80-мм образцов связующего;
- трехточечный изгиб на базе 150-мм образцов фанеры;
- трехточечный изгиб на базе 150-мм образцов трехслойных панелей;
- растяжение на базе 100-мм образцов стеклопластика;
- вдавливание в верхнюю обечайку цилиндрического фрагмента трехслойной панели стального сферического индентора диаметром 25 мм.

Использовалось кинематическое нагружение, т.е. задавалось смещение рабочей траверсы испытательной машины и с помощью цифрового динамометра в ней определялись вертикальные реактивные усилия с построением соответствующих диаграмм.

Рабочими смещениями в сериях экспериментов выступали 1 мм, 3 мм, 5 мм, 10 мм, что позволяло повторять «упругие» участки диаграмм большее число раз при доведении образцов до разрушения.

В настоящей работе проанализируем в основном изгибные испытания, в силу подготовки вычислительной модели именно для такого вида де-

формирования и в силу наибольшего количества именно таких испытаний среди всех проведенных. На рис. 4 (см. вклейку) представлены результаты измерений усилий для составляющих ТК (обработка в PTC MathCAD [11]). При заданных уровнях перемещения нелинейность диаграмм малая.

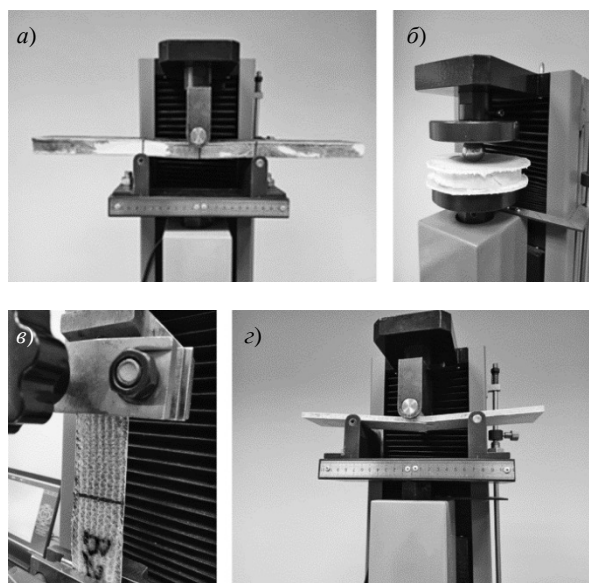


Рис. 3. Виды нагружений: а, г) трехточечный изгиб; б) вдавливание индентора; в) растяжение

Fig. 3. Loading types: a, d) three-point bending; b) indenter punching; c) tension testing

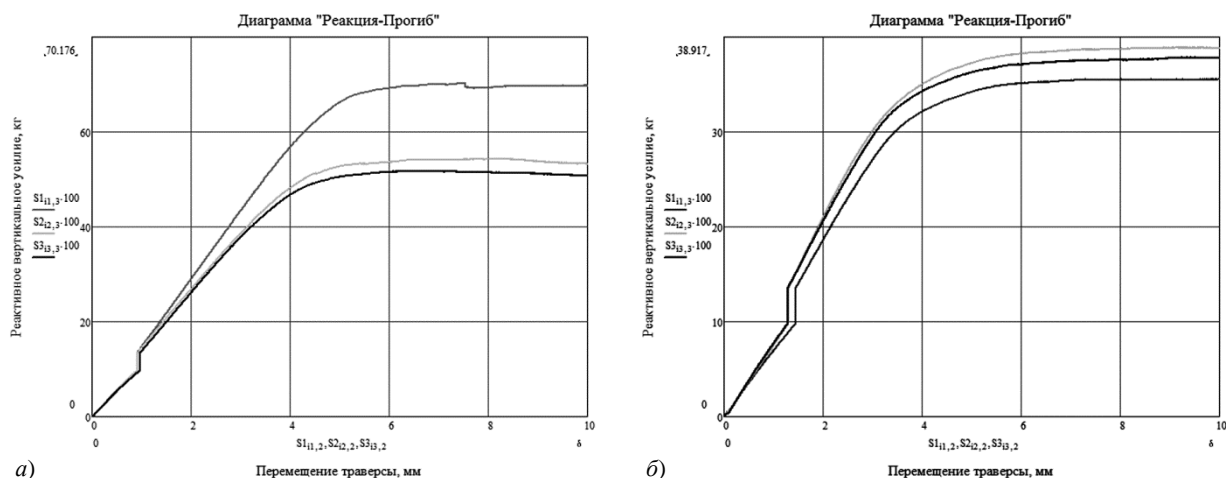


Рис. 6. Экспериментальные диаграммы испытаний серий из 3 образцов на трехточечный изгиб на базе 150 мм: а) образцы с наполнителем ЭПС-1; б) с наполнителем ЭПС-2

Fig. 6. Three-point bending curves for a series of 3 specimens (base 150 mm): a) specimens with XPS-1 filler; b) specimens with XPS-2 filler

Поскольку фанера рассматривается как базовый материал и ее справочные характеристики при разных видах нагружения разнятся, проведены испытания и этих образцов, которые должны были дать верхнюю и нижнюю оценку упругих свойств (рис. 5, см. вклейку). Для образцов, изгибаемых вдоль направления волокон наружных слоев, жесткость и прочность фанеры оказываются в обратной зависимости по отношению к образцам, изгибаемым поперек волокон наружных слоев. При заданном прогибе 5 мм первые гарантированно разрушались, но уровень предельной нагрузки был около 100 кг, вторые деформировались упруго и без разрушения, однако достигали заданного прогиба уже при 21–22 кг.

Испытания трехслойных образцов с наполнителями типа ЭПС-1 и ЭПС-2 проводились для разных уровней нагружения. При этом прогиб 4–5 мм также явился критическим, при нем начались процессы разрушения (рис. 6). Однако при этом образцы вели себя в большей степени подобно пластичному материалу, нарушений сплошности как в несущих слоях, так и в наполнителе не наблюдалось, несущая способность сохранялась на константном уровне. Очевидно, локальные смятия и сдвиги в наполнителе, а также переход эластомера на нелинейную ветвь собственной диаграммы обеспечили такой характер кривых на рис. 6. Здесь также виден существенный разброс упругих и предельных характеристик, обусловленный описанными выше причинами.

Оценка модуля упругости для различных образцов в первом приближении может быть произведена с помощью балочных моделей. Закладываемые в них экспериментальные отклики осреднены.

Оценка упругих констант материалов по балочной теории

Assessment of elastic constant for the materials as per the beam theory

Расчетная схема для трехточечного изгиба – свободно опертая балка под действием сосредоточенной силы, прогиб которой в центре известен:

$$W = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}. \quad (1)$$

Из (1) с учетом прямоугольной формы сечения всех образцов можем определить эквивалентные модули Юнга. Сведем результаты оценок в таблицу.

Значения модулей для фанеры, ЭПС и стеклопластика, получаемые простой оценкой по балочной модели, оказываются в диапазонах, приводимых в учебной и справочной литературе. Модули же для связующего и сэндвича при такой оценке существенно ниже, чем у фанеры. Это не соответствует наблюдаемому в эксперименте результату, когда изгибная жесткость ТК по предельному усилию уступает фанере лишь в 2,5–3 раза, а не на порядок.

Произведем оценку эквивалентной изгибной жесткости трехслойной балки из разномодульных материалов по смесевой модели с учетом наличия переносных моментов инерции обечаек [8].

Пусть все слои сечения имеют одинаковую ширину $b = 55$ мм, толщины несущих слоев – по $h_0 = 1$ мм, толщина заполнителя $h_z = 19$ мм. За начало отсчета выбирается любая фибра. Каждый слой считаем изотропным с модулями $E_{gp} = 9000$ МПа для стеклопластика и $E_{xps} = 15$ МПа для заполнителя.

Согласно модели изгиба многослойной балки [8], изгибная жесткость пакета определяется как

$$D = C_2 - \frac{C_1^2}{B}, \quad (2)$$

где

$$B = E_{gp} \cdot b \cdot h_0 + E_{xps} \cdot b \cdot h_z + E_{gp} \cdot b \cdot h_0,$$

$$C_1 = \frac{b}{2} \left[\begin{aligned} &E_{gp}(h_0^2 - 0^2) + E_{xps}((h_0 + h_z)^2 - h_0^2) + \\ &+ E_{gp}((h_0 + h_z + h_0)^2 - (h_0 + h_z)^2) \end{aligned} \right],$$

$$C_2 = \frac{b}{2} \left[\begin{aligned} &E_{gp}(h_0^3 - 0^3) + E_{xps}((h_0 + h_z)^3 - h_0^3) + \\ &+ E_{gp}((h_0 + h_z + h_0)^3 - (h_0 + h_z)^3) \end{aligned} \right]. \quad (3)$$

Правильность вычисления геометрических характеристик составного сечения подтверждает ко-

ордината нейтральной оси пакета относительно выбранной оси сравнения: $e = C_1/B = 10,5$ мм.

В итоге эквивалентный модуль квазиоднородной балки оказывается равным

$$E_{eqv} = \frac{D}{I} = 4824,2 \text{ МПа},$$

т.е. приблизительно в 2,3 раза ниже модуля фанеры при изгибе вдоль наружных волокон и во столько же раз выше ее модуля при изгибе поперек наружных волокон, что и показывают диаграммы.

Таким образом, испытания и расчетная оценка подтверждают, что трехслойная панель из однослойных стеклопластиковых обечаек с 20-мм заполнителем из экструдированного пенополистирола обладает жесткостью и прочностью, сопоставимыми с этими же параметрами традиционного строительного материала (хвойной фанеры) и при использовании конструктивных подкреплений может применяться в строительстве облегченного маломерного судна.

Естественным образом напрашивается увеличение толщины пакета до 30 мм, поскольку в линейке размеров эта толщина – следующая за 20 мм. Возможно повторение серии испытаний и для таких ТК. При этом представляется, что полученной, хоть и с большим разбросом, экспериментальной информации уже достаточно для отработки подробной конечно-элементной модели. При ее наличии

Таблица. Оценка упругих свойств по простейшей модели

Table. Elasticity assessment based on the simplest model

Параметр	Образец	Заполнитель (ЭПС)	Слой стеклопластика	Связующее	Трехслойный композит	Фанера продольн.	Фанера поперечн.
Базовая длина × сечение (средние размеры, мм)		100×(55×19)	100×(36×1,05)	80×(9×9)	150×(55×21)	150×(55×6,5)	150×(55×6,5)
Момент инерции фигуры в периметре сечения, мм ⁴		31 437,1	3,5	546,75	42 446,25	1258,7	1258,7
Контрольный прогиб на линейной ветви диаграммы, мм		1	5	5	3	4	4
Среднее измеренное усилие на прогибе, кг		2	0,8	2,4	35	95	19
Эквивалентный модуль, МПа		13,25	9598,2	96,4	194/4824	10 613,65	2122,73
Модуль справочный, МПа		15	9000–30000	–	–	7000–12000	1500–4000

будет возможно проведение достоверных расчетных оценок прочности и жесткости любых геометрически сложных конструкций, а также быстрая оценка преимуществ, получаемых при увеличении толщин заполнителя, применении проставок и т.п. мер повышения жесткости и прочности.

Моделирование трехточечного изгиба трехслойного образца методом конечных элементов

FE simulation for three-point bending of triple-layered specimen

Численная модель должна обладать достаточной подробностью для учета трехосного НДС в заполнителе и при этом быть экономичной. Модели слоистой балки и слоистой оболочки (ламината) ограничены рядом гипотез [8], а модель только на основе объемного конечного элемента весьма ресурсоемка. Компромиссным вариантом является

комбинация элементов-солодов [9] с ламинатными оболочечными (рис. 7). Программа ANSYS имеет в своем арсенале необходимые элементы.

На начальном этапе исследования материалы слоев принимаются изотропными, линейно-упругими, обечайки являются однослойными пластинами. Свойства материалов задаются как средние, полученные в экспериментах. Используется возможность относительного смещения срединной поверхности элементов оболочки относительно заданного положения, что уточняет расчет учет переносных моментов инерции.

Имитация реального контактного взаимодействия оснастки испытательной машины для трехточечного изгиба с поверхностями образца выполняется с помощью контактных пар элементов (рис. 7) [9], из которых «целые» КЭ представляются абсолютно жесткими цилиндрическими телами, а собственно «контактные» КЭ, аккумулирующие поверхностные реакции (кон-

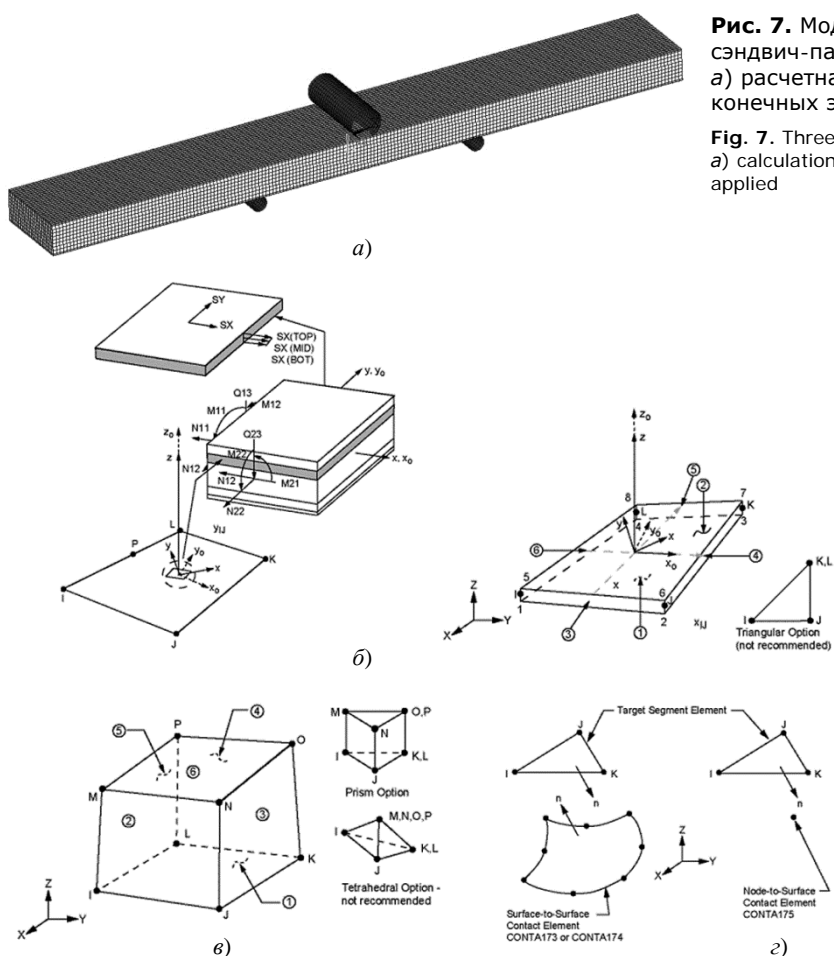


Рис. 7. Модель трехточечного изгиба сэндвич-панели:
 а) расчетная сетка; б, в, г) типы используемых конечных элементов

Fig. 7. Three-point bending model for a sandwich panel:
 a) calculation mesh; b, c, d) types of finite elements applied

тактные давления), наносятся на деформируемые поверхности.

Непрогнозируемая область контакта и высокая разница модулей ТК, могущая дать большие деформации, вызывают необходимость решать задачу в геометрически нелинейной постановке. Решение выполняется по шаговой процедуре с использованием для корректировки мгновенной жесткости метода Ньютона – Рафсона [10]. Потребовалось около 30 шагов.

Система координат модели – балочная (продольная ось – X , ось прогибов – Z). Для устойчивого счета в модели закрепляются от перпендикулярных перемещений узлы в плоскостях симметрии модели XOZ , YOZ . Нагружение задается аналогично реальному – вертикальным смещением опор базы относительно закрепленного валика ножа на 1 м.

На рис. 8 (см. вклейку) представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния модели в целом и ее отдельных составляющих.

Реактивное вертикальное усилие в расчетной модели (16,6 кг) близко к значениям, полученным в эксперименте (15–20 кг). Основные напряжения – изгибные, в обечайках, около 17 МПа, максимальные напряжения в заполнителе – сдвиговые. Эквивалентные напряжения в заполнителе на 2 порядка ниже, чем в обечайках.

Подробное моделирование, как видно, дает результаты, достаточно близкие к наблюдаемым в эксперименте при малом возмущении, даже без учета реальной нелинейно-упругой диаграммы эластомера и с упрощенной моделью несущих слоев. Таким образом, предлагаемый способ моделирования и определенные экспериментально параметры материалов, составляющих ТК, пригодны для расчетных оценок прочности и жесткости.

Заключение

Conclusion

Полученные результаты позволяют дать положительный ответ о применимости бытового пенопласта для создания корпусных оболочек маломерных низконагруженных судов учебно-туристского назначения.

Разработанные численные модели и подходы к расчету нелинейного деформирования могут быть развиты в следующих направлениях:

- учет физической нелинейности материалов ТК;
- учет адгезионных разрушений с помощью т.н. когезионных контактных элементов;

- анализ устойчивости обечаек в линейной и нелинейной постановке;
- уточнение упругих свойств ЭПС и стеклопластика на основе применяемой арматуры и связующего путем дополнения комплекса вычислительных моделей расчетами на продольное растяжение и сжатие этих компонентов.

Ряд полученных экспериментально результатов уже в настоящее время может служить источником информации для валидации высоконелинейных моделей (рис. 9, см. вклейку).

Список использованной литературы

1. *Цыварев М.В., Ветлугина А.С.* Предпроектный анализ разработки секционной кадетской гребно-парусной шлюпки с использованием композитных материалов // Неделя науки СПбГМТУ-2021: сборник докладов Всерос. фестиваля науки «Наука 0+»: в 3 т. Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2021. Т. 3. С. 461–470.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XVI. Конструкция и прочность судов из полимерных композиционных материалов: НД № 2-020101-152 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2022. 16 с.
3. DNV-RU-YACHT. Rules for Classification: Yachts. Pt 2. Materials and Welding. Ch. 3. Non-metallic materials / Det Norske Veritas. Høvik: DNV, 2021. 6, [1] p.
4. ISO 12215-5:2008. Small craft: Hull construction and scantlings. Pt 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination. Geneva: Int. Organization for Standardization, 2008. 115 p.
5. ISO 12215-6: 2008. Small craft: Hull construction and scantlings. Pt 6: Structural arrangements and details. Geneva: Int. Organization for Standardization, 2008. 59 p.
6. *Дю Плесси Х.* Малотоннажные суда из стеклопластика: оснащение, обслуживание, ремонт. Ленинград: Судостроение, 1979. 342 с.
7. *Пастушков П.П., Жеребцов А.В.* Об эффективности применения экструдированного пенополистирола в ограждающих конструкциях первых и цокольных этажей // Строительные материалы. 2015. № 7. С. 68–71.
8. *Скворцов Ю.В.* Механика композиционных материалов: конспект лекций / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева. Самара, 2013. 94 с.
9. *Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф.* ANSYS для инженеров: справ., пособие. Москва: Машиностроение; Машиностроение-1, 2004. 511 с.
10. *Бененсон А.М., Миронов М.Ю., Родионов А.А.* Численные методы оценки предельных нагрузок судовых конструкций. Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2013. 117 с.

11. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в MathCAD 15 : учебный курс. Москва [и др.] : Питер, 2011. 399 с.
12. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XVI. Конструкция и прочность корпусов судов и шлюпок из стеклопластика : НД № 2-020101-087 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2016. 31 с.
10. Benenson A., Mironov M., Rodionov A. Numerical assessment methods for limit loads on ship structures. St. Petersburg : St. Petersburg Marine Technical University, 2013. 117 p. (*in Russian*).
11. Makarov Ye. Engineering calculations in MathCAD 15: Training Course. Moscow [et al.]; Piter, 2011. 399 p. (*in Russian*).
12. RS Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XVI. Structure and Strength of Fiber-Reinforced Plastic Ships and Boats. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2016 (*in Russian*).

References

1. Tsyvarev M., Vetlugina A. Pre-design analysis of a compound row-sail boat for cadets with application of composite materials // SMTU Science Week-2021. Compendium of papers, All-Russian Science Festival “Nauka 0+”. In 3 vol. St. Petersburg : SMTU, 2021. Vol. 3. P. 461–470 (*in Russian*).
2. RS Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XVI. Structure and Strength of Fiber-Reinforced Plastic Ships. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2022 (*in Russian*).
3. DNV-RU-YACHT. Rules for Classification : Yachts. Pt. 2. Materials and Welding. Ch. 3. Non-metallic materials / Det Norske Veritas. Høvik : DNV, 2021. 6, [1] p.
4. ISO 12215-5:2008. Small craft : Hull construction and scantlings. Pt. 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination. Geneva : Int. Organization for Standardization, 2008. 115 p.
5. ISO 12215-6: 2008. Small craft : Hull construction and scantlings. Pt. 6: Structural arrangements and details. Geneva : Int. Organization for Standardization, 2008. 59 p.
6. Du Plessis H. Fibreglass Boats: Fitting-out, Maintenance and Repair (*Russian translation*). Leningrad : Sudostroyeniye, 1979. 342 p.
7. Pastushkov P., Zherebtsov A. On application efficiency of extruded foam polystyrene in enclosing structures of first and ground floors // Stroitelnye Materialy (Construction Materials Russia). 2015. No. 7. P. 68–71 (*in Russian*).
8. Skvortsov Yu. Mechanics of composite materials. Synopsis of lectures / Samara State Aerospace University named after S. Korolev. Samara, 2013. 94 p. (*in Russian*).
9. Chigarev A., Kravchuk A., Smalyuk A. ANSYS for engineers : Reference Book. Moscow : Mashinostroyeniye ; Mashinostroyeniye-1, 2004. 511 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Цыварев Марк Владимирович, студент факультета кораблестроения и океанотехники ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: m.tsyvarev@mail.ru.

Ветлугина Анна Сергеевна, студентка факультета кораблестроения и океанотехники ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: a.vetluginaa@gmail.com.

Миронов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: mironov31051973@mail.ru.

About the authors

Mark V. Tsyvarev, Student, Shipbuilding and Marine Engineering Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: m.tsyvarev@mail.ru.

Anna S. Vetlugina, Student, Shipbuilding and Marine Engineering Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: a.vetluginaa@gmail.com.

Mikhail Yu. Mironov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Ship Structural Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, post code 190121, Russia. E-mail: mironov31051973@mail.ru.

Поступила / Received: 29.04.22

Принята в печать / Accepted: 07.10.22

© Цыварев М.В., Ветлугина А.С., Миронов М.Ю., 2022

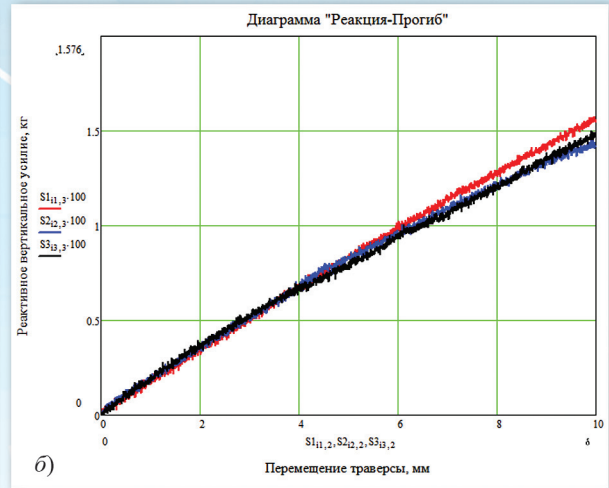
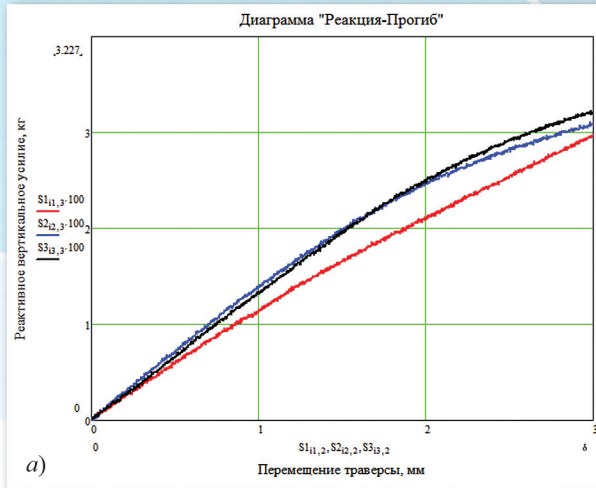


Рис. 4. Экспериментальные диаграммы испытаний серий из 3 образцов на трехточечный изгиб:
 а) образцы типа ЭПС-1 толщиной (высотой сечения) 18 мм с заданным прогибом 3 мм;
 б) полосовые образцы стеклопластикового слоя средней толщиной около 1 мм с заданным прогибом 10 мм;
 в) образцы отвержденного связующего (на усилии 10 кг ликвидируется люфт в траверсе оборудования, не связанный с видом образца)

Fig. 4. Three-point bending curves for a series of 3 specimens:
 a) XPS-1 specimens, thickness (section height) 18 mm, pre-sagging by 3 mm;
 b) GRP straps, average thickness ≈ 1 mm, pre-sagging 10 mm;
 c) hardened binder specimens (at 10 kg load, the displacement in the test equipment frame (not related to the specimen type) becomes zero)

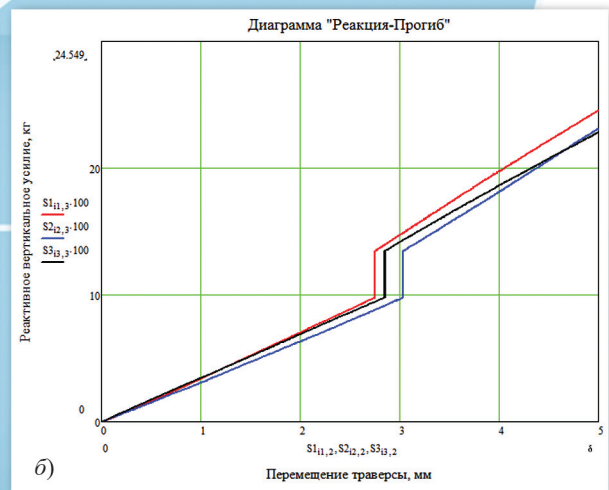
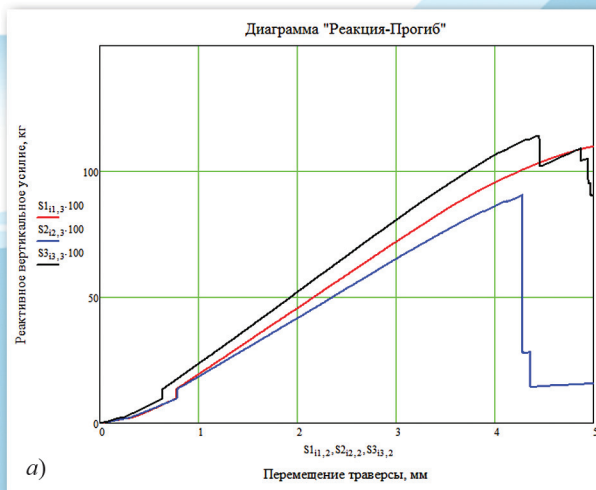
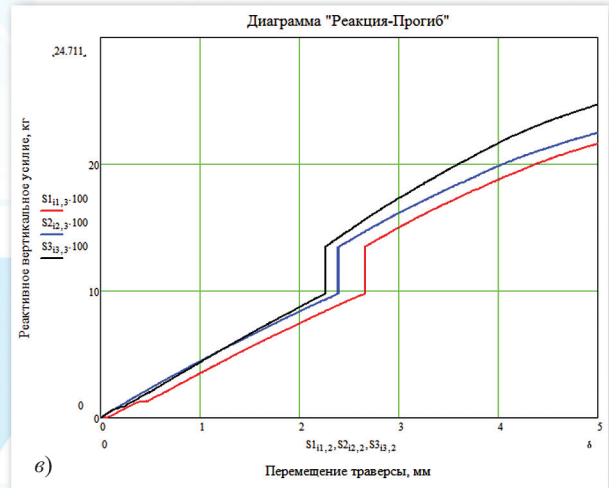


Рис. 5. Экспериментальные диаграммы испытаний серий из 3 образцов на трехточечный изгиб на базе 150 мм с заданным прогибом 5 мм: а) фанерные образцы, вырезанные вдоль волокон наружного шпона; б) фанерные образцы, вырезанные поперек волокон наружного шпона

Fig. 5. Three-point bending curves for a series of 3 specimens (base 150 mm, pre-sagging 5 mm): a) plywood specimens cut out along the fibers of the outer veneer; b) plywood specimens cut out across the fibers of the outer veneer

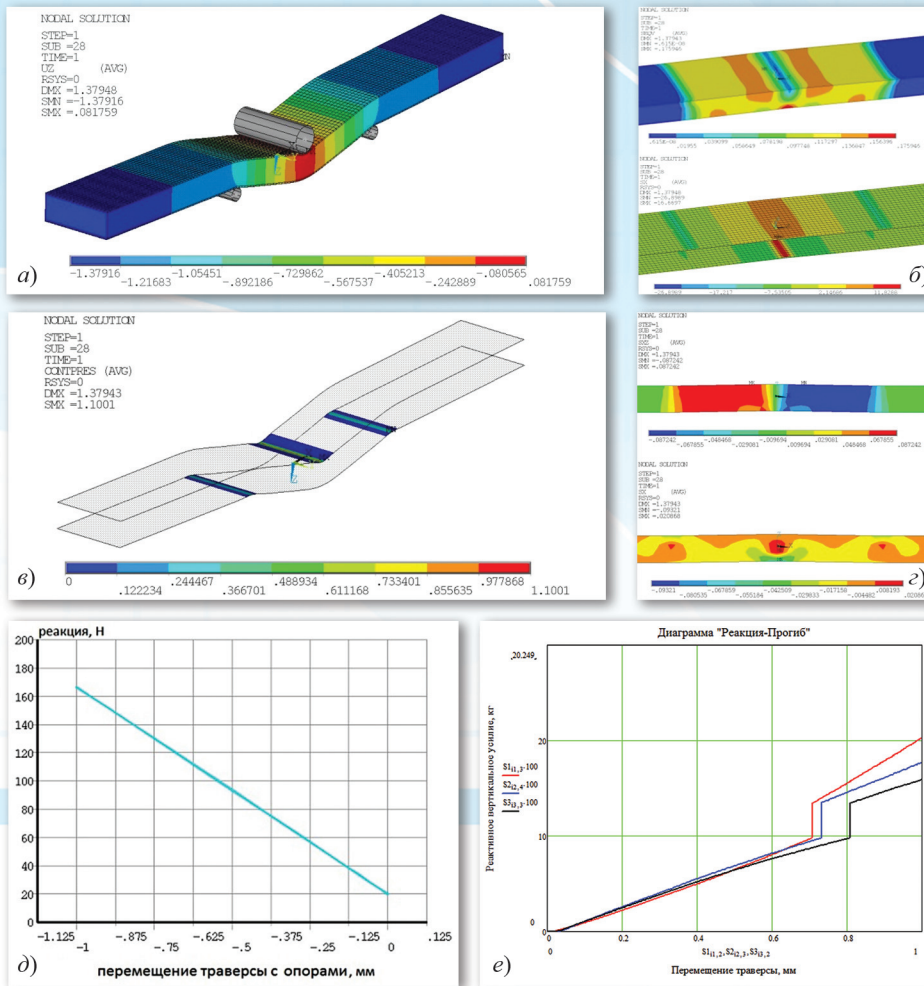


Рис. 8. Результаты численного конструктивно-подобного моделирования трехточечного изгиба трехслойного образца: а) прогибы модели (масштаб); б) сравнение напряжений Мизеса в наполнителе и обечайках; в) контактные давления на обечайках; г) сравнение сдвиговых и продольных деформаций в наполнителе; д) расчетная диаграмма «смещение – реакция»; е) экспериментальная диаграмма (при усилии 10 кг – выбор люфта в оборудовании)

Fig. 8. Results of numerical structurally similar simulation (three-point bending of a three-layered specimen): а) model sags (scaled); б) von Mises stresses in the filler and the casings; в) contact pressures on casings; г) comparison of shear and longitudinal deformations in the filler; д) calculated "displacement – reaction" diagram; е) "displacement-response" diagram (calculated); ф) experimental diagram (at 10 kg, test equipment displacement vanishes)

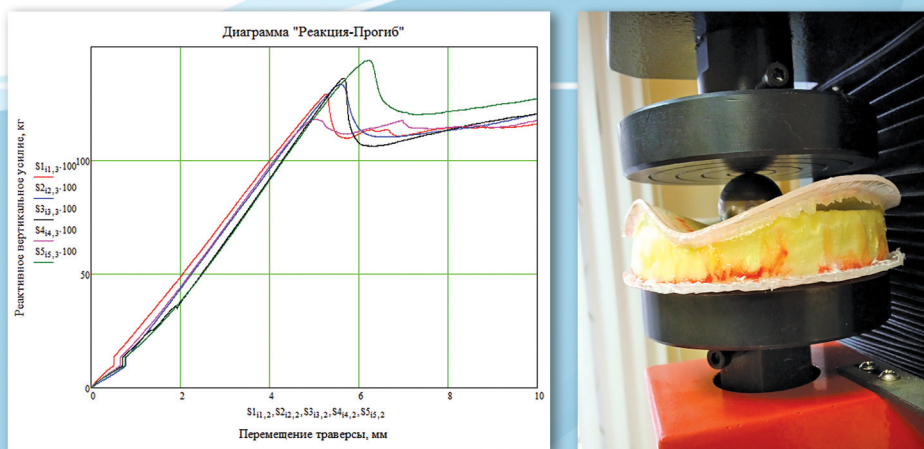


Рис. 9. Диаграммы испытаний цилиндрических сэндвич-образцов на разрушающее вдавливание шара-индентора
Fig. 9. Experimental curves for cylindrical sandwich samples (destructive punching of a ball indenter)