

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СВАРНЫХ ГОФРОВЫХ ПАНЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ РАЗРУШЕНИЯ

Г.Б.Крыжевич

*Центральный научно-исследовательский институт им. акад. А.Н.Крылова,
Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44,
e-mail: albert @ krylov.spb.su.*

Рассмотрены вопросы рационального проектирования конструкций высокоскоростных судов, изготавливаемых из полуфабрикатов нового типа – тонкостенных сварных гофровых панелей. Разработаны типоразмерные ряды панелей (с полимерным наполнителем и без него).

Возможности снижения материалоемкости металлических конструкций, создаваемых с использованием традиционных технологий, весьма ограничены. Так, например, заметное снижение материалоемкости на основе совершенствования нормирования и методов расчетов прочности осуществимо только при изначальном несовершенстве норм и методов. Создание новых материалов повышенной прочности и их внедрение может существенно изменить материалоемкость конструкций, работающих в условиях переменного нагружения, если при этом оказывается возможным решить чрезвычайно сложную задачу – повысить характеристики сопротивления усталости и трещиностойкости этих материалов и выполненных из них соединений и узлов конструкций. Кроме того, необходимым условием внедрения ряда высокопрочных материалов (например, сталей) является наличие увеличенных характеристик коррозионной стойкости.

Эффективное снижение материалоемкости возможно при использовании принципиально новых технологий создания конструкций, основанных на внедрении новых видов высокопроизводительной сварки и изготавливаемых с ее помощью новых типов полуфабрикатов. В частности, выполненные поисковые работы показывают перспективность внедрения в ближайшие годы технологических решений, основанных на применении в судостроении и других областях техники новых типов панелей, представляющих собой два наружных листа, соединенных между собой внутренним гофрированным листом (каркасом), и имеющих в поперечном сечении вид фермы (рис. 1).

Внутренние полости панели могут быть полыми или содержать полимерный наполнитель. Наличие внутреннего наполнителя повышает устойчивость наклонных пластинчатых элементов гофрированного листа и пластин обшивки, прочность и жесткость конструкции панели в целом, шумопоглощающие и виброизоляционные свойства, а также обеспечивает теплоизоляцию и другие положительные качества.

Для соединения наружных листов с гофрированным внутренним элементом панели возможно применение электронно-лучевой, лазерной, либо контактной роликовой сварки (рис. 1). При такой технологии имеется возможность получения тонкостенных гофровых панелей (ГП) с толщиной листов менее 3 мм, не выпускаемых ныне промышленностью и представляющих большой интерес для судостроения.

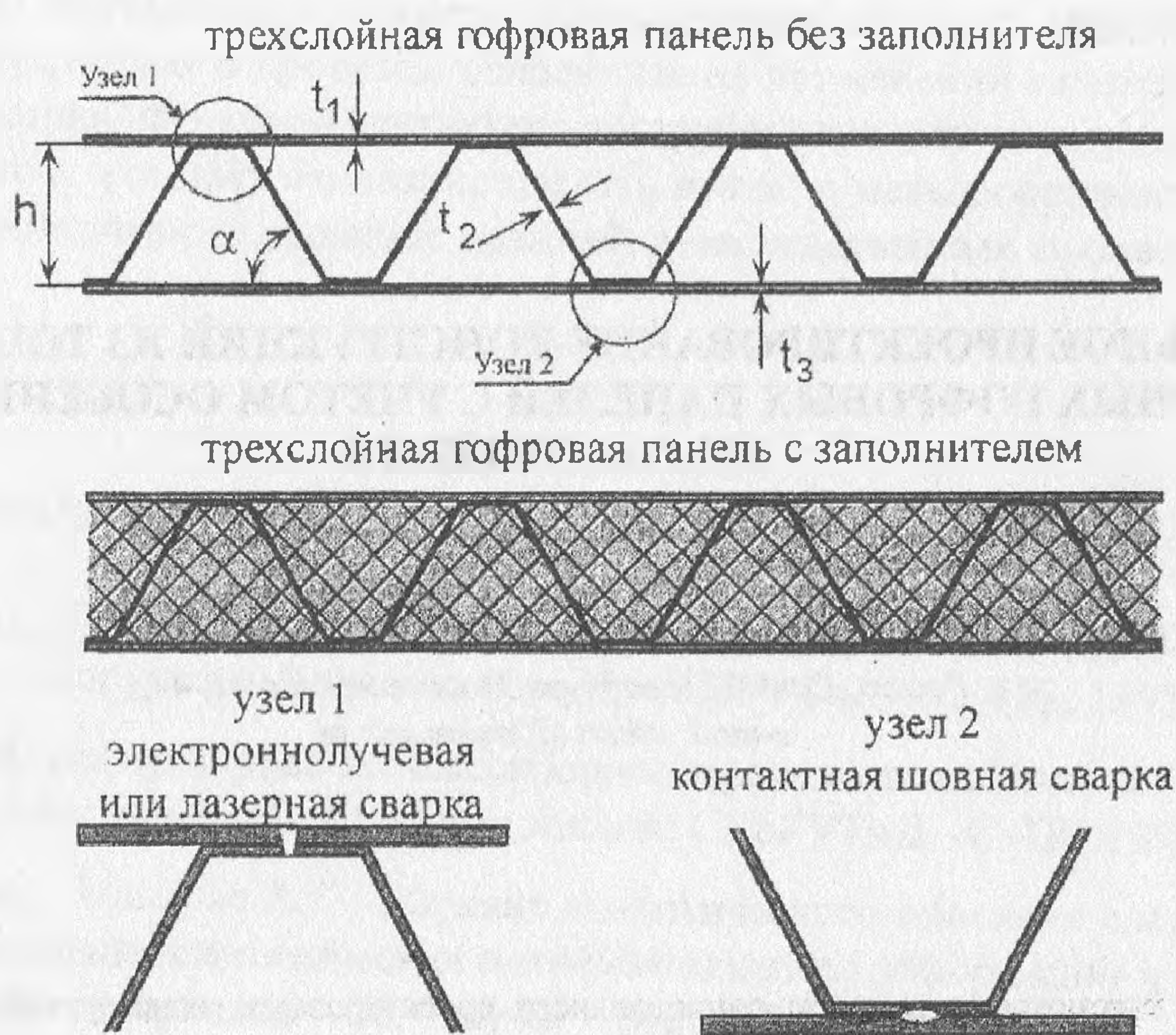


Рис. 1. Тонкостенная сварная гофровая панель и ее узлы.

Целями настоящей работы являются оценка эффективности использования тонкостенных ГП в составе типовой силовой конструкции судового корпуса-перекрытия, подверженного воздействию гидродинамического давления, установление рациональных соотношений геометрических параметров панелей для формирования их типоразмерных рядов, а также разработка рекомендаций по рациональному проектированию конструкций из панелей нового типа.

Решение проблем рационального выбора соотношений размеров поперечных сечений панелей, построения их типоразмерного ряда и формулировки принципов рационального проектирования конструкций из ГП может быть получено на основе оптимизации упомянутой типовой конструкции. Для осуществления оптимизации разработан алгоритм и программа для ПЭВМ [1]. Выбор оптимальных решений производился на основе критерия минимума массы перекрытия. Само перекрытие рассматривалось как ГП, подкрепленная продольным набором, ориентированным вдоль гофров, и поперечным рамным набором, расположенным перпендикулярно к гофрам. Такая схема ориентации балок представляется предпочтительней как по технологическим причинам (узлы соединения гофров панели со стенкой балки более просты в том случае, когда стенка параллельна гофрам), так и по соображениям прочности (опирание панели на стенку балки, ориентированную поперек гофров и привариваемую только к одной обшивке панели, приводит к большим контактным напряжениям в районе сопряжения наклонных стенок гофров со стенкой балки).

При расчете напряженно-деформированного состояния перекрытия считалось жестко заделанным по всем четырем кромкам. Для расчета напряжений в элементах гофровой панели при изгибе ее в направлении, перпендикулярном к гофрам, использовались метод конечных элементов, а также методы, применяемые при расчете ферм [2].

При назначении величин допускаемых напряжений за основу приняты рекомендации нормативно-технических документов Российского Морского Регистра Судоходст-

ва [3, 4]. Поскольку ориентировка на старую нормативную базу при изготовлении конструкций по новой технологии не всегда корректна, выполнена экспериментальная оценка влияния технологических факторов на несущую способность и ресурс конструкций. При этом принято во внимание, что работоспособность сварных ГП в значительной мере определяется свойствами материала в районе сварных швов и геометрией элементов панели в "околошовной" зоне, от которой зависит уровень концентрации напряжений. Для установления характера влияния изменения структуры материала в зонах швов и в зонах термического влияния на прочностные и усталостные свойства панелей выполнены испытания образцов, моделирующих работу узла сварного соединения обшивки панели с гофровым элементом при двух видах нагружения:

- при действии растягивающих напряжений во внешних слоях (обшивках) панели в направлении, перпендикулярном ориентации швов и гофров;
- при действии касательных напряжений в плоскости соединения внешних слоев панели с вершинами гофров, развивающихся при изгибе панелей (наиболее неблагоприятен изгиб в направлении, перпендикулярном к швам).

Статические и ресурсные испытания образцов из стали марки РСД (Ст.3), в которых соединения выполнялись лазерной сваркой (ЛС), и алюминиево-магниевого сплава марки 1561, в которых швы выполнялись электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) производились на универсальной испытательной машине МУП-20. Испытания образцов на растяжение показали, что наложение шва с помощью ЭЛС поперек растягивающим усилиям заметно снижает среднее значение временного сопротивления листового материала марки 1561 (~ на 18%) и характеристики его разброса (в 2,5-3 раза). Результаты испытаний сварных соединений на сдвиг также продемонстрировали аналогичный характер влияния ЭЛС на прочность сварных конструкций и более существенное снижение характеристик прочности по сравнению с имеющим место при использовании обычной аргоно-дуговой сварки. Исследования структуры материала сварного шва дают основания полагать, что одной из причин такого снижения прочности и охрупчивания материала является более высокая концентрация окисных включений в зоне шва. На основе данных испытаний и оценок, выполненных методами теории надежности [5], допускаемые нормальные и касательные напряжения в конструкциях из сплава 1561 снижены по сравнению с рекомендованными нормативным документом [3] на 16%.

Испытания стальных образцов показали, что ЛС влияет на прочность сварных соединений примерно также как и обычная электродуговая сварка, в связи с чем действующие нормы прочности [4] приняты и для новых типов стальных панелей.

При выполнении оптимизационных расчетов перекрытия варьировались в широком диапазоне следующие параметры: размеры поперечного сечения панели h , t_1 , t_2 и α (см. рис. 1), плотность материала заполнителя, расстояние между балками (шпация) продольного (ориентированного вдоль гофров) набора L_n и поперечного рамного набора L_p . Оптимизация выполнялась при различных уровнях поперечной нагрузки на перекрытие, полагавшейся равномерно распределенной по площади перекрытия. Типоразмерный ряд ГП формировался на основе оптимизации перекрытий (как оптимальные панели, соответствующие различным уровням внешней нагрузки).

Для панелей без заполнителя оптимальные значения угла наклона стенки гофра к горизонтальной плоскости обычно лежат в диапазоне $45-65^\circ$. Поскольку при этом зависимость массы перекрытия от этого угла имеет пологий характер, варьирование α в указанном диапазоне приводит к изменению материалоемкости не более чем на 3% (рис. 2).

С ростом нагрузки наблюдается тенденция к увеличению оптимальных значений параметра h и шпации набора L_n . Однако оптимальные значения L_n лежат в относи-

тельно узких пределах (от 0,8 до 1,2 м). При выполнении условной оптимизации перекрытия (при условии фиксирования параметра L_n) получена зависимость массы перекрытия от шпации L_n , представленная на рис. 3. Из графиков, приведенных на рисунке для алюминиево-магниевого сплава с пределами текучести материала σ_T , равными 180 и 200 МПа, следует, что увеличение шпации L_n по сравнению с ее оптимальным значением приводит к существенному росту материалоемкости конструкции. Попытка создания безнаборной конструкции (в которой отсутствуют балки, подкрепляющие панель) приводит к увеличению ее массы по сравнению с наборным вариантом в 2-2,5 раза. Это обстоятельство делает целесообразным применение ГП в сочетании с продольным и поперечным набором. Из оптимизационных расчетов также следует, что шпация поперечного набора должна существенно (примерно в 4 раза) превышать шпацию продольного набора.

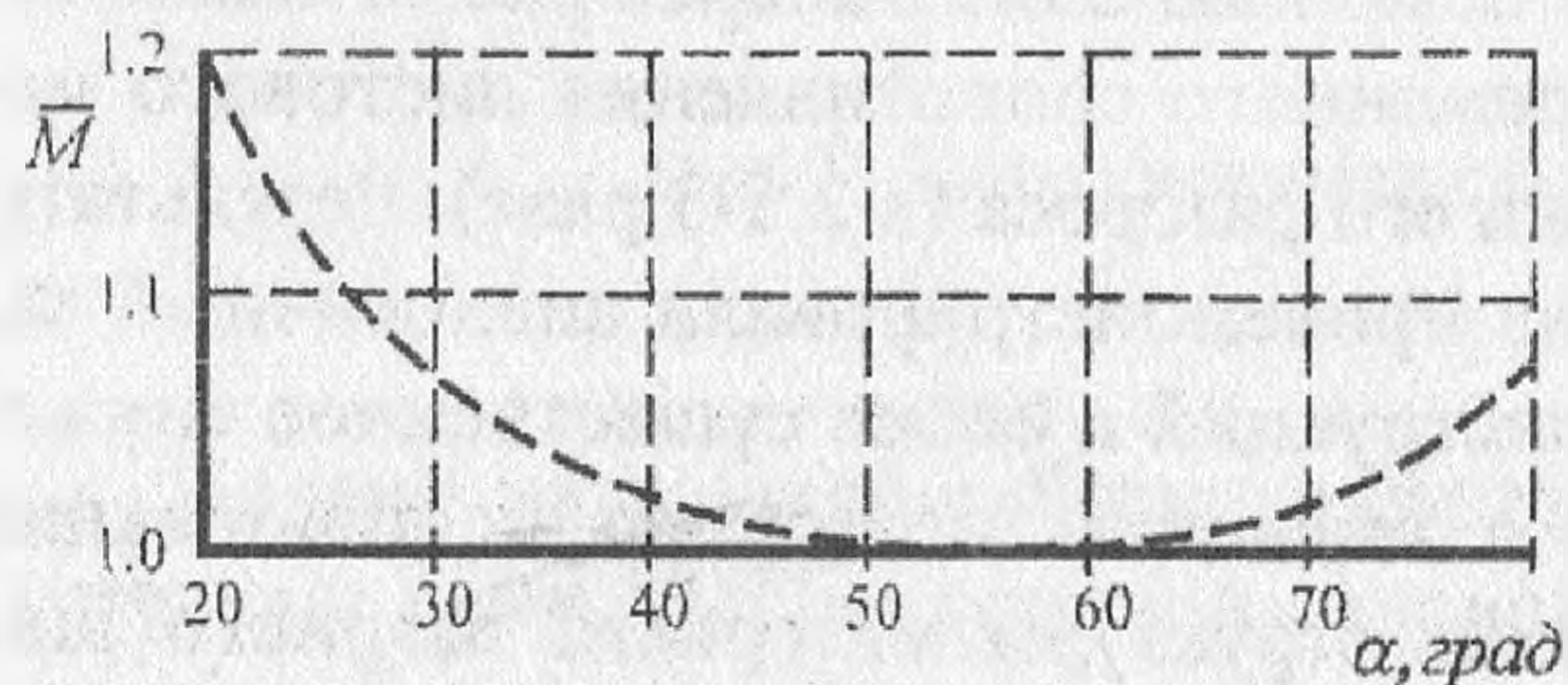


Рис. 2. Зависимость относительной массы панели (отнесенной к ее минимальному значению, соответствующему оптимальным параметрам панели) от угла наклона гофрового элемента α (материал панели – сталь с пределом текучести 235 МПа).

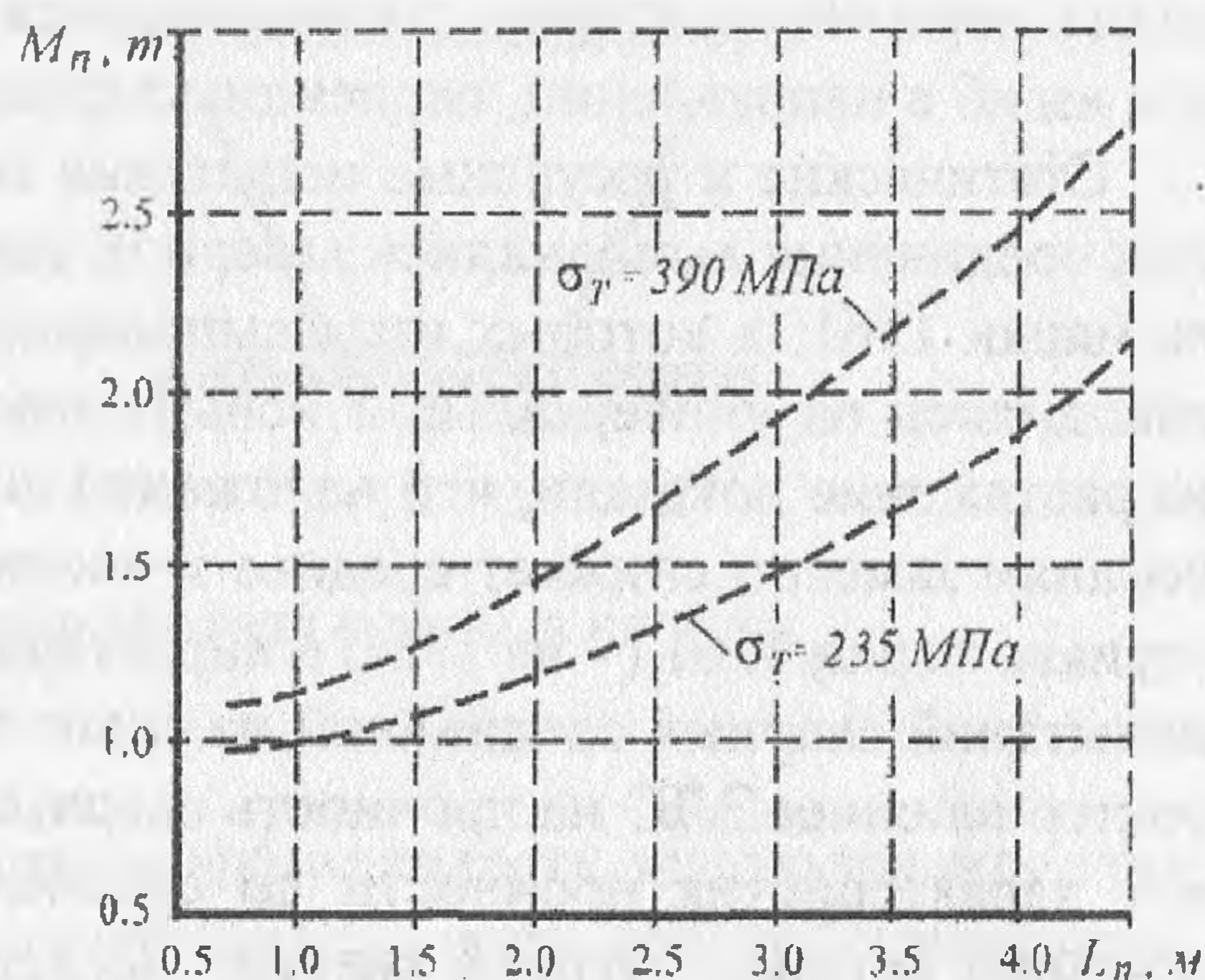


Рис. 3. Зависимость массы перекрытия M_n от шпации продольного набора L_n при различных пределах текучести алюминиево-магниевого сплава.

Эффект от использования полимерного заполнителя панелей, повышающего устойчивость пластин панели при действии в них сжимающих и сдвиговых усилий, существенно зависит от его плотности (рис. 4). Снижения материалоемкости панелей из сплава 1561, вообще говоря, можно достичь только при использовании заполнителей с плотностью менее 0,2 г/см³. Однако с учетом увеличения трудоемкости изготовления реальный экономический эффект от применения заполнителя в алюминиевых панелях достигим лишь при плотности заполнителя 0,15 г/см³ или менее и в стальных панелях при плотности 0,35 г/см³ или менее. В настоящее время достаточные механические характеристики заполнителя (например, сферопластика), обеспечивающие необходимые запасы устойчивости пластин панели, достигаются при значении его плотности порядка 0,1 г/см³, которое и принято в качестве расчетной величины при создании типоразмерных рядов ГП с заполнителем.

Достоверность расчетных оценок подтверждена результатами статических испытаний сварных гофровых панелей на трехточечный изгиб до разрушения. Испытания продемонстрировали удовлетворительное совпадение замеренных деформаций элементов панели с расчетными данными. При испытаниях одинаковых образцов наблю-

дались различные формы разрушения панели (потеря устойчивости равновесия пластин обшивки панели, отслоение обшивки от гофрированного элемента и разрыв гофра в районе его приварки к обшивке), подтверждающие реализацию принципа равнопрочности элементов панели и рациональность выбора размеров этих элементов.

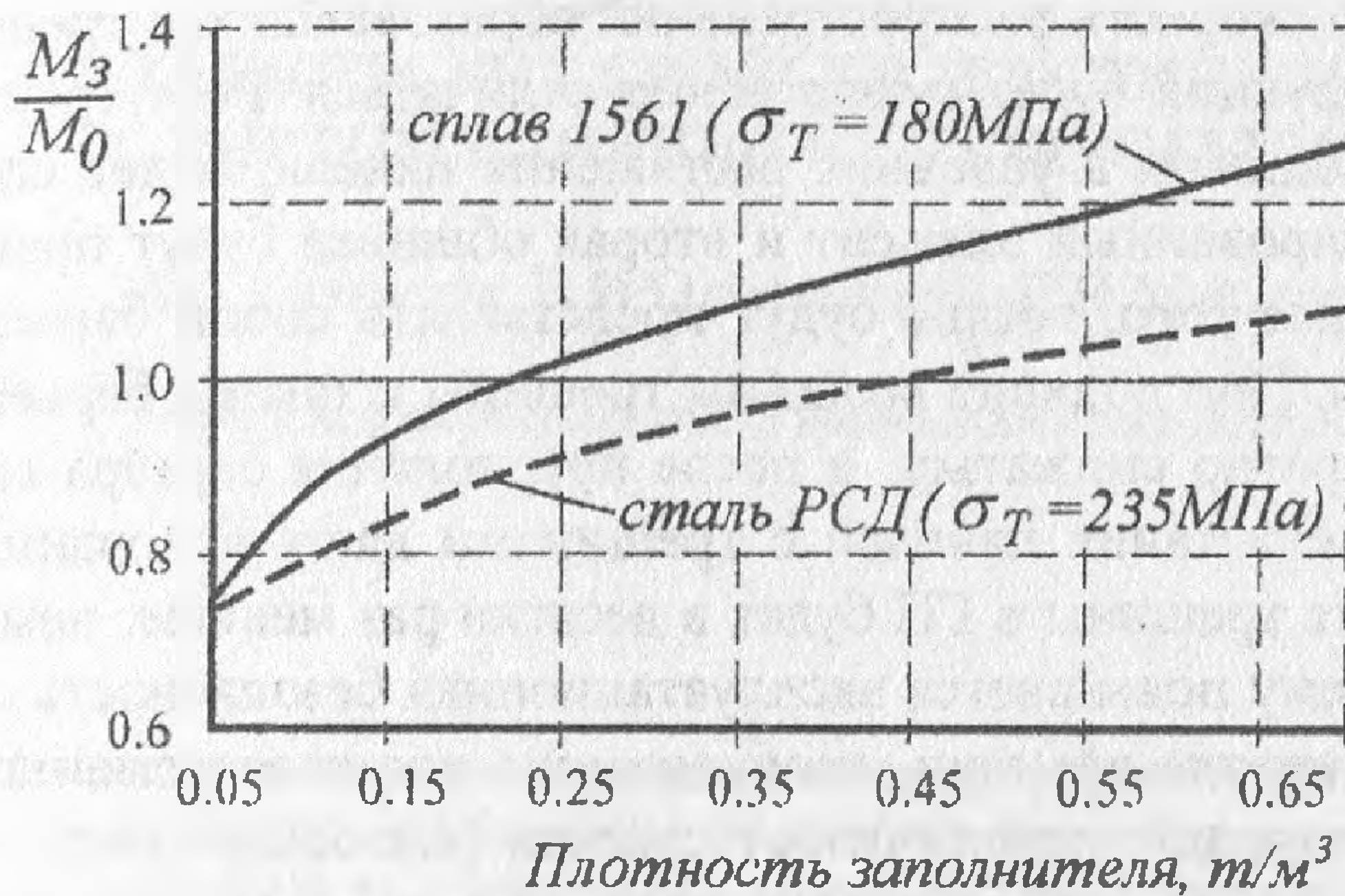


Рис. 4. Отношение масс перекрытий, выполненных из гофрированных панелей с заполнителем (M_3) и без него (M_0), в зависимости от плотности заполнителя.

Для оценки целесообразности внедрения в конструкции скоростных судов новых полуфабрикатов - гофрированных панелей, изготавливаемых с использованием ЛС и ЭЛС, - необходимо ясное представление об их преимуществах (прежде всего по материалоемкости и эксплуатационной надежности) по сравнению с конструкциями, производимыми по традиционным технологиям. Результаты сопоставления материалоемкости проектируемых по условиям местной прочности судовых конструкций из ГП с конструкциями, создаваемыми по традиционной технологии, представлены на рис.5. Приведенные на них данные говорят о том, что снижение веса конструкций, работающих в условиях воздействия местных нагрузок, благодаря использованию новых конструктивно-технологических решений может быть практически более эффективным по сравнению с другими возможными мерами.

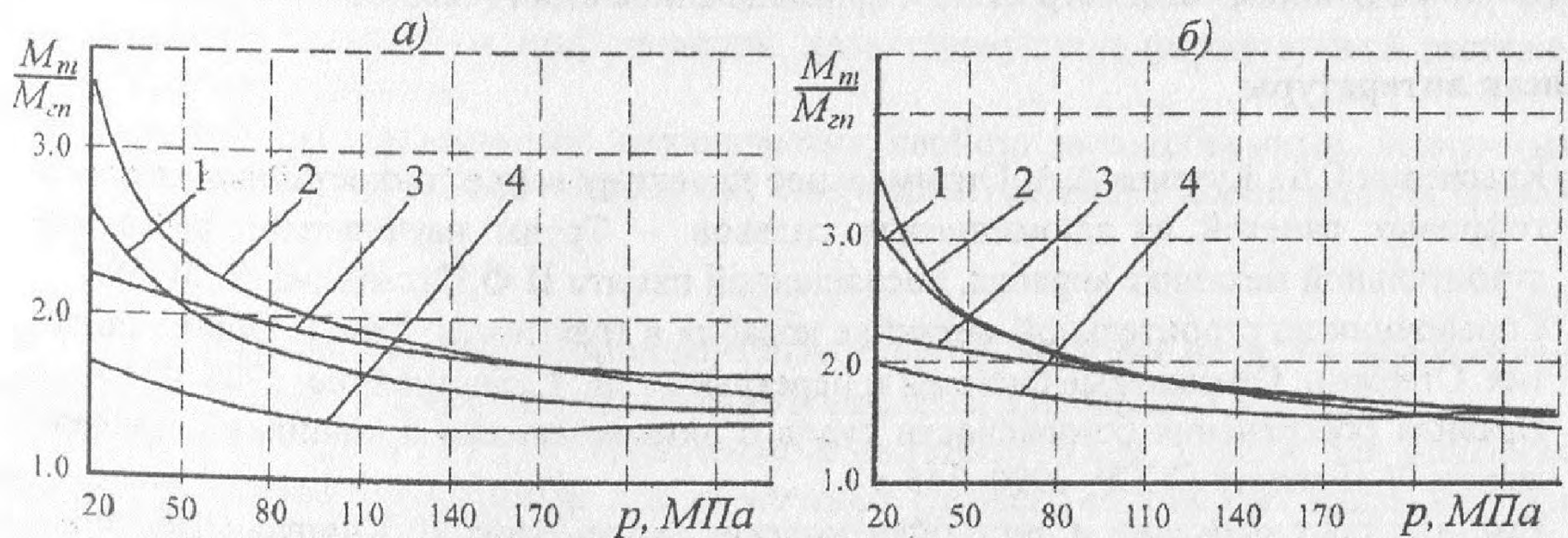


Рис. 5. Отношение массы перекрытия M_m , оптимально спроектированного на основе традиционной технологии, к массе перекрытия M_{cn} , созданного с использованием гофрированных панелей (а - без заполнителя, б - с заполнителем) при различных уровнях расчетной нагрузки на перекрытие p : 1 - панель из сплава 1561; 2 - панель из стеклопластика; 3 - сталь Д40; 4 - сталь РСД.

Снижение материалоемкости не является единственным преимуществом применения ГП в составе судового корпуса. Можно ожидать, что при достаточно высоком качестве оформления узлов соединения панелей показатели их долговечности (эффективные коэффициенты концентрации напряжений) будут находиться на том же уровне, что и аналогичные характеристики узлов конструкций, проектируемых по традиционным технологиям. Однако скорость распространения образовавшихся трещин в обычных и новых типах конструкций будет существенно отличаться. Рост трещины, образовавшейся в одной из обшивок в условиях растяжения панели, будет сдерживаться благодаря тому, что гофрированный элемент и вторая обшивка будут препятствовать раскрытию трещины. Кроме того, гофры будут представлять собой барьеры на пути распространения трещины. При подходе вершины трещины к такому барьеру скорость ее развития будет многократно снижаться, а после преодоления барьера снова увеличиваться. Выполненные испытания панелей с трещинами дают основания полагать, что средняя скорость роста трещины в ГП будет в десятки раз меньше, чем в обычной конструкции, благодаря чему повышается эксплуатационная безопасность сооружения (за счет увеличения промежутка времени, необходимого для своевременного выявления трещины). Для конструкций транспортных средств (высокоскоростных судов из легких сплавов, самолетов) может быть существенно повышен регламентный межмоторовый период и снижены эксплуатационные расходы.

При оценке целесообразности применения ГП необходимо учесть не только положительные последствия (снижение материалоемкости, повышение трещиностойкости и живучести конструкций), но и определенные технологические препятствия. К ним можно отнести большую сложность создания соединений панелей с разными толщинами и шагами гофрировки, значительную трудоемкость изготовления конструкций с малым радиусом кривизны поверхности (при $R < 0,5$ м).

В связи с этими обстоятельствами ГП целесообразно применять прежде всего в тех сооружениях, где не требуется изменение толщины панели на значительной протяженности. Резюмируя сказанное, можно рекомендовать использование тонкостенных ГП в ближайшей перспективе в конструкциях надстроек, рубок, переборок и платформ судов различного назначения и водоизмещения. Гораздо больший объем применения новых полуфабрикатов возможен при создании судов малого водоизмещения и высокоскоростных судов, в которых все силовые конструкции корпуса могут выполняться из ГП. Областями рационального использования таких панелей могут быть также авиационная техника, вагоностроение и промышленное строительство.

Список литературы

1. Крыжевич Г.Б., Кутенев А.А. Оптимальное проектирование тонкостенных сварных гофровых панелей из алюминиевых сплавов. – Труды научно-техн. конф. по строительной механике корабля, посвященной памяти П.Ф.Папковича. С. 56-59.
2. Справочник по строительной механике корабля в трех томах. Том 1. Общие понятия. Стержни. Стержневые системы и перекрытия. Л.: Судостроение, 1982. 415 с.
3. Правила обеспечения безопасности судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Регистр СССР, 1990. 345 с.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 1999. 373 с.
5. Крыжевич Г.Б. Основы расчетов надежности судовых конструкций. Учебное пособие. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского морского технического университета, 1995. 245 с.