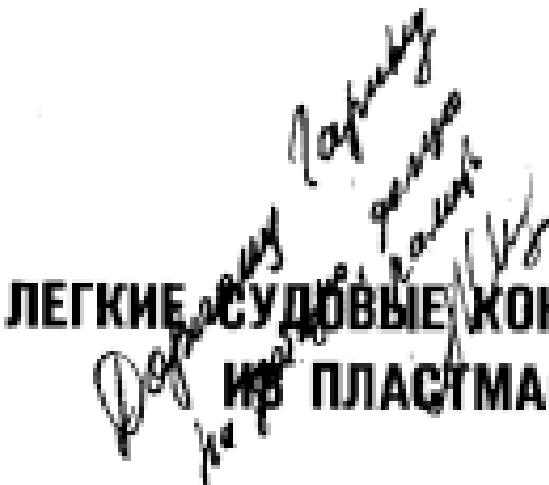


В. А. БЛАГОВ, А. П. КАЛМЫЧКОВ, В. Н. КОБЕЛЕВ, Б. Ф. ПРОХОРОВ



# ЛЕГКИЕ СУДОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ из ПЛАСТИМАСС



ИЗДАТЕЛЬСТВО „СУДОСТРОЕНИЕ“  
Ленинград  
1968

Книга посвящена основным вопросам расчета, конструирования и эксплуатации легких судовых конструкций из пластмасс.

Даны классификации легких судовых конструкций и регулируются требования, которыми эти конструкции должны удовлетворять. Рассматривается опыт применения пластмассовых настилов, рубок, переборок в отечественных и зарубежных судостроениях, приводятся результаты их испытаний и эксплуатации.

Правилами освещены способы оценки прочности изготавливаемого материала, общими из сферы и обобщенности. Насчитываются основные положения расчета скелетных соединений. Особое внимание уделяется применению конструируемых пластмассовых надстроек и переборок, способы расчета их прочности, подводки электропроводов и кабелей. Отделение главы посвящено особенностям проектирования троеколейных конструкций.

Рассмотрены вопросы решения пластмассовых конструкций, пригодных для применения технико-экономической эффективности. Излагаются правила термика безопасности и охраны труда при работе с пластмассовыми массами в судостроении.

Книга рассчитана на конструкторов и технологов судостроительной промышленности, а также может быть использована студентами кораблестроительных факультетов и учащимися судостроительных политехнических колледжей.

Стр. 264, рисунок 109, таблица 47, библиография 127 наименований.

2-18-6  
22-88

## От авторов

Технический уровень судостроения в значительной степени определяется соответствием применяемых материалов растущим эксплуатационным и конструктивным требованиям.

С каждым годом все более широкое применение в судостроении находят новые, обладающие комплексом необходимых свойств материалов, ведущая роль среди которых принадлежит пластмассам.

Использование в судостроении пластмасс и других синтетических материалов обеспечивает успешное решение таких важных и актуальных задач, как замена металла, экономия веса, увеличение срока службы конструкций и их надежности в эксплуатации, упрощение технологии изготовления. Это обуславливается пециальными свойствами пластмасс, их достаточно большой механической прочностью при малом удельном весе.

Однако до настоящего времени решение вопросов, связанных с внедрением пластмассовых масс в судостроение, встречает определенные трудности. Такое положение можно объяснить как недостаточностью информации о результатах работ в этой области, так и отсутствием необходимых установок и рекомендаций по расчету, конструированию и изготовлению пластмассовых судовых конструкций.

Настоящая книга имеет целью ознакомить читателей с основными вопросами по проектированию и изготовлению пластмассовых судовых конструкций, рубок, переборок и дать материалы, необходимые конструкторам и технологам в их практической деятельности. Она не претендует на исчерпывающее описание всех сторон проблемы, что в застонные времена практически невозможно сделать в объеме одной книги. Предлагаемые авторами решения видимо не должны рассматриваться как

единственно правильные и окончательные. Однако приведенные в книге положения и данные помогут в определенной степени специалистам в области пластмассового судостроения учесть особенности пластмасс при решении конкретных задач по проектированию и изготовлению судовых пластмассовых конструкций.

Книга написана по результатам выполненных многолетних исследований, проведенных под руководством авторов.

Отзывы и замечания по книге следует присыпать в адрес издательства: Ленинград, Л-65, ул. Гоголя, 8.

## Глава I

### КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕГКИХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

#### § 1. Легкие судовые конструкции

Судовые конструкции по степени участия их в общем (продольном и поперечном) изгибе, а тем самым и в обеспечении общей прочности судна в целом, можно условно подразделить на две большие категории: прочные и легкие (а трансвертальное судостроение надстройки принято называть соответственно длинными и короткими).

Прочные надстройки участвуют в общем изгибе судна и должны конструктироваться как верхние связи корпуса, подвергающиеся соответствующим нагрузкам. К легким относятся те надстройки, которые имеют малой протяженности или недостаточной жесткости поперечные подпалубные связи корпуса (для рубок — поперечные переборки или рамные балки, подкрепляемые пандусами) не предназначены для участия в сопротивлении общему продольному изгибу судна. Подробный анализ факторов, определяющих степень включения надстроек в общий изгиб судна, выполненный Н. Л. Сиверсом [94], показывает, что в качестве основного критерия следует принимать не отношение длины надстроек к длине судна, как это принято в настоящее время, а отношение длины надстроек к полу perimeter ее сечения. Нужно отметить, что такой подход к классификации надстроек из длинных и коротких (прочных и легких) отражен в Правилах Норвежского Бюро Веритас и заложен в основу издаваемых Правил Регистра СССР.

Как известно, использование длинных стальных надстроек в качестве эффективной продольной связи корпуса не всегда рационально, поскольку это может привести к значительному повышению центра тяжести судна и ухудшению его остойчивости. Для уменьшения степени участия таких надстроек в общем изгибе судна вводят расширительные соединения. С этой же целью применяют легкие амортизирующие сплавы, имеющие модуль нормальной упругости  $E=0,7 \cdot 10^4$  кг/см<sup>2</sup>, что наряду

со зважительными уменьшением усилий от общего изгиба существенно уменьшает вес надстроек.

Очевидно, что применение для надстроек, устанавливаемых на металлический корпус, пластмасс, имеющих модуль нормальной упругости  $E = (1.5 \div 1.8) \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$  и объемный вес  $\gamma = 1.7 \div 1.8 \text{ г/см}^3$ , должно привести к более существенному эффекту. Можно предположить, что степень участия таких надстроек в изгибе судна, ввиду более низкой их жесткости по сравнению с жесткостью металлического корпуса, не должна зависеть от размеров надстроек.

Такое предположение, как показал проведенный анализ, близко к действительности.

Полагая, что полное включение пластмассовой надстройки в общий изгиб металлического судна не изменяет положение нейтральной оси сечения судна, определим условия, при которых напряжения в наружной палубе надстроек будут заведомо меньше допускаемых.

Напряжения в наружной палубе надстроек могут быть определены из выражения:

$$\sigma_{\text{нр}} = \frac{\sigma - h}{e}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{нр}}$  — напряжение в наружной палубе надстроек;

$\sigma_{\text{нр}}$  — напряжение в верхней палубе стального корпуса;

$h$  — высота надстроек;

$e$  — отстояние верхней палубы корпуса от нейтральной оси его сечения;

$\chi = \frac{E_s}{E_p}$  ( $E_s$  — модуль упругости стеклопластика,  $E_p$  — модуль упругости стали).

На основании (1) высота надстроек, при которой напряжения в надстройке и верхней палубе корпуса равны допускаемым, может быть определена из условия

$$h \leq e \left( \frac{|\sigma_{\text{нр}}|}{|\sigma_{\text{нр}}|} \cdot \frac{1}{\chi} - 1 \right) \quad (2)$$

если подставить числовое значение, полагая  $E_s = 1.7 \div 10^6 \text{ кг/см}^2$ ,  $E_p = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ ,  $|\sigma_{\text{нр}}| = 400 \text{ кг/см}^2$ ,  $|\sigma_{\text{нр}}| = 1200 \text{ кг/см}^2$ , получим  $h \leq e \cdot 2.9$ .

Учитывая, что для большинства судов  $e \approx 1 \text{ м}$ , можно заключить, что для надстроек с реальной высотой перекрытий практически исключено.

Следовательно, можно сделать вывод, что в соответствии с существующей классификацией металлических надстроек пластмассовые надстройки, устанавливаемые на металлический корпус, независимо от их длины могут рассматриваться как легкие (короткие), т. е. размеры их силы можно рекомендовать

назначать только по соображениям их местной прочности (или из конструктивных и технологических соображений).

Кроме главных поперечных и продольных переборок, делающих корпус на непропицаемые отсеки и участвующих в обеспечении общей поперечной и продольной прочности, каждое судно имеет второстепенные переборки и выгородки в основном корпусе, надстройках и рубахах, выполняющие самые разнообразные функции и обеспечивающие нормальную эксплуатацию судна.

Основным критерием, определяющим выбор конструктивных элементов и материала переборок, является необходимая прочность. По величине необходимой прочности все второстепенные переборки и выгородки можно подразделить на опорные, опорные и безопорные, или разделительные.

Опорные переборки и выгородки предназначаются для выполнения непропицаемых отсеков, их конструктивные элементы выбираются из условия прочности при действии расчетного гидростатического давления.

Опорные переборки и выгородки служат опорами для перекрытий палуб, а также могут входить в состав подкреплений под различными наружными установками и конструкциями (вышерасположенные ярусы надстроек, устройства и т. д.). В качестве опорных могут выступать переборки и выгородки всех категорий при обеспечении достаточной прочности и надежности дополнительных местных подкреплений.

Безопорные, или разделительные, переборки и выгородки в зависимости от места расположения могут быть проницаемыми и газо-, водонепроницаемыми. Они служат для выделения всякого рода помещений, разделения помещений и закрепления различного оборудования (например, коеч, приборов и т. п.). Такого рода переборки и выгородки принято называть легкими.

## § 2. Анализ требований к легким переборкам

Основными документами, регламентирующими размеры связей стальных судовых конструкций и их конструктивное оформление, являются Правила классификационных обществ.

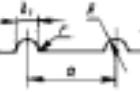
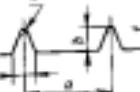
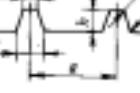
Как показано в работах [14], [94], Правила различных классификационных обществ содержат определенные расхождения в требованиях к размерам связей надстроек. Это затрудняет создание единой методологии проектирования надстроек из новых материалов — алюминиево-магниевых сплавов и пластмасс.

Легкие переборки и выгородки по регламентируются Правилами классификационных обществ, конструктивные элементы выбираются главным образом из основания опыта эксплуатации (если эти переборки не являются опорными или напорными).

В настоящее время широко применяются переборки на гофрированных листах; конструктивные элементы таких переборок указаны в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные элементы легких выгородок, мм

Схема	$t$	$b_1$	$b_2$	$a$	$R$	$r$	$s$
	1+2	40	—	—	20	5	250
	2+4	40	—	30	8; 10	8; 10	250
	3+4	50	—	40	8; 10	8; 10	350

Однако выбор конкретных значений толщины и размеров гофров не связывается с определенным критерием, а производится, на основе опыта, воспитывает субъективный характер. При пересчете выбранных таким образом связей из стали на легкие сплавы и пластмассу возможны ошибки, которые могут резко снизить ожидаемую эффективность.

Ниже делается попытка найти величину условной поперечной равномерно распределенной нагрузки, определяющей конструктивную прочность легких выгородок, и производится оценка возможных деформаций палубных балок при их поперечном изгибе и переходе шлангутной рамки при скручивании корпуса судна. Очевидно, что возникающие при этом в переборке усилия не должны вызывать потерю устойчивости листов или стоеч.

С целью выявления условной поперечной нагрузки анализировались требования Правил классификационных обществ

к минимальным прочным размерам конструкций, близких по характеру работы к легким выгородкам (требование непосредственно по легким выгородкам не имеется). К таким конструкциям можно отнести: разделительные переборки в машинно-котельных отделениях; коренные переборки средних надстроек и рубок; торцевые переборки юта и бака; бортовые стени юта и коротких средних надстроек с минимальными конструктивными размерами; листы легких выгородок.

Согласно Правилам Норвежского Бюро Толщина листов аварийных переборок должна определяться из зависимости:

$$t = 0,0034l_{\text{min}} \sqrt{h} + 1,5 \text{ мм}, \quad (3)$$

где  $l_{\text{min}}$  — расстояние между стойками, мм;

$h$  — расчетный натяг, м. зод. ст.;

1,5 мм — добавка за износ листов.

Минимальные толщины при  $l_{\text{min}} \leq 700$  мм

$$t_{\text{min}} = 0,006l_{\text{min}} + 1,5 \text{ мм}, \quad (4)$$

Зависимость  $t = f(l_{\text{min}}, h)$  для аварийных переборок, заданные в Правилах Регистра СССР, Американского Бюро судоходства и Английского Ллойда, как показали исследования Н. Е. Путова, носят аналогичный характер (рис. 1).

Предполагаем, что конструкции стенных надстроек и рубок, не воспринимающие усилия от общего изгиба, удовлетворяют требованиям прочности из восприятие давления при заливании палубы  $\Delta p$  (табл. 2) и требованиям конструктивной прочности. Тогда из формулы (3) можно определить суммарное значение

$$\Delta = \Delta_p + \Delta_T.$$

Величины для  $\Delta_T$  приведены по данным для палуб в соответствии с табл. 2. Выделав расчетный натяг  $\Delta_T$ , можно получить условную поперечную нагрузку  $\Delta_T$ , определяющую конструктивную прочность.

Для легких гофрированных выгородок со стойками в качестве расчетной схемы в упрощенном виде принимается балансировка со свободным отрывом по концам.

Предельное сопротивление при такой схеме можно считать фиброзную текучесть, при этом толщина листов легких выгородок оценивается по формуле:

$$t_{\text{cr}} = 0,0056l_{\text{min}} \sqrt{h} + 1,5, \quad (5)$$

Очевидно, что такое выявление  $t_{\text{cr}}$  из регламентированных толщин рассматриваемых конструкций возможно при

$$t_{\text{реглам.}} > t_{\text{min}}$$

Таблица 2

Расчетные кашеры для торцовок стенок защищенных ютов  
и кормовых стекок средних надстроек, м. вод. ст.

Двигатель	$t_1, \text{м}$							
	35	55	75	95	115	135	155	175 и более
	$\beta = 0,25 - 4,5 \cdot \frac{1}{L}$							
	4	10	15	14	36	18	30	25 и более
Регистр СССР (правила)	0,76 0,95	0,83 0,93	0,95 1,15	1,15 1,35	1,35 1,54	1,54 1,66	1,55 1,70	1,55 1,70
Регистр СССР (правила про- ности)	0,8 1,0	0,8 1,0	0,95 1,15	1,15 1,35	1,35 1,55	1,55 1,75	1,5 1,6	1,5 1,6
Портовый Берегпас	0,20 0,81	0,34 1,02	1,0 1,22	1,18 1,63	1,34 1,63	1,51 1,80	1,58 1,80	1,80 1,80
Азовский Ладож	0,6 0,72	0,86 1,03	1,10 1,39	1,30 1,59	1,47 1,73	1,56 1,75	1,63 1,75	1,68 1,75

Примечание. 1.  $L$  и  $\beta$  — соответственно длина и ширина судна.  
2. Число под звездой соответствует  $TM=0,7$ , под чертой —  $TM=0,8$ .

Результаты анализа требований Правил показывают, что для судов малой длины (60—40 м и менее) торцовые стекки защищенных ютов и кормовые стекки средних надстроек имеют толщины стенок рубок 4—5 м при ширинах 750 мм. Эти толщины являются минимальными для рассматриваемых конструкций.

Соответствующие значения  $t_{\text{шк}}$  для ширин 250, 350, 450 мм будут: с учетом добавки на износ 3,0, 3,6, 4,2 мм; без учета добавки на износ 1,6, 2,1, 2,7 мм.

Для судов длиной 140 м и более назначаются постоянные значения толщины стенок. Стабилизируется и расчетное значение напора (см. табл. 2).

Для торцовок стенок защищенного юта этих судов при  $t=9,5$  м  $k=1,78$  м вод. ст.;  $b_p=1,7$  м вод. ст., отсюда  $k_p=0,08$  м вод. ст.

Для кормовых стенок рубок первого яруса при  $t=6,0$  м  $k=1,33$  м вод. ст.;  $b_p=1,25$  м вод. ст. и  $k_p=0,1$  м вод. ст.

Таким образом, можно полагать, что условной поперечной нагрузкой для легких пытогородок может являться напор —

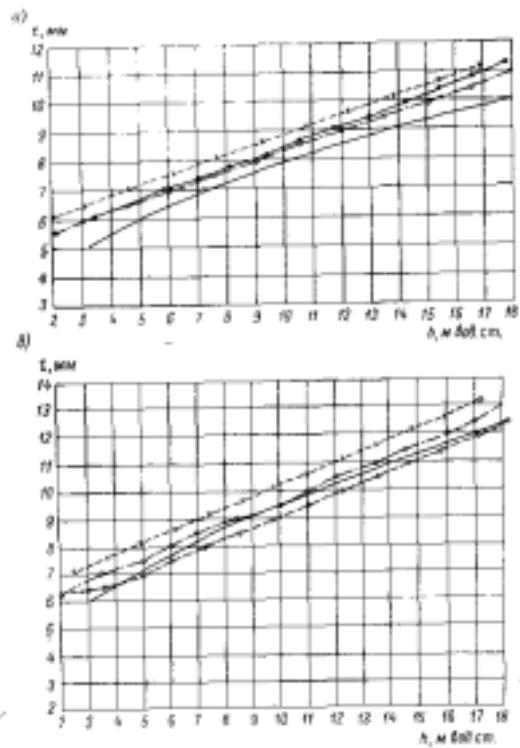
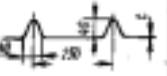
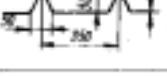
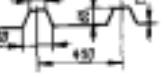


Рис. 1. Толщина листов, регламентируемых Правилами Классификации Общества в зависимости от расчетного напора  $TM$ : расстояние между ютами: а — 800 м; б — 750 м.

- x — x — днепровское пароходство;
- ● ● — волжская Ладож.
- ○ ○ — кас. и Министр СССР, кн. рис. 6 — Регистр СССР в Азовской Ладож.
- □ — □ — волжское Берегпас.
- △ — △ — финляндские Берега Берегов.

Значения сечек гофрированных переборок

Сечение переборки	$\delta=1 \text{ мм}$	$\delta=2 \text{ мм}$	$\delta=3 \text{ мм}$	$\delta=4 \text{ мм}$		
	$I, \text{ см}^3$	$W_{\text{пл}} \text{ см}^3$	$I, \text{ см}^3$	$W_{\text{пл}} \text{ см}^3$	$I, \text{ см}^3$	$W_{\text{пл}} \text{ см}^3$
	1,2	0,7	2,5	1,4	—	—
	—	—	3,9	1,5	5,9	2,2
	—	—	10,1	2,9	12,2	3,5
	—	—	—	—	71,6	14,9
					93,7	18,8

Эйлероны напряжение пластин гофрированных выгородок, равные  $\sigma_e = 200 \left( \frac{100}{\delta^2} \right)$ , приведены в табл. 6, а элементы гофрированной переборки показаны на рис. 2.

Сравнение значений напряжений, приведенных в табл. 6, и эйлеровых, приведенных в табл. 6, можно видеть, что потеря устойчивости листов верхних участков легких выгородок в поперечном направлении в районе сечений бимсов возможна, так как напряжения сжатия (350 кг/см<sup>2</sup>, 760 кг/см<sup>2</sup>) могут превзойти эйлеровы.

В табл. 7 и 8 помещены результаты расчета по определению податливости легких выгородок. Расчеты выполнены для гофрированной переборки (рис. 2), имеющей размеры:  $\delta=60 \text{ мм}$ ,  $b_1=80 \text{ мм}$ ,  $b_2=50 \text{ мм}$ ,  $a=350 \text{ мм}$ ,  $a^*=a-b$ .

Высота выгородки  $A$  принималась равной 2500 мм, пролет бимса  $\Gamma=0,338$ . Вычисления производились для листов толщиной  $t$  от 1 до 4 мм, для которых соответственно вычислялись

$\delta_y=0,1 \text{ м}$  под. ст. В этом случае критерий для назначения толщины выгородок будет расстояние между стойками.

Вид формулы для определения толщины легкой выгородки может быть следующим:

$$t_{\text{дв}} = 0,007 I_{\text{пл}} \text{ мм.} \quad (6)$$

В табл. 3 приводятся значения моментов сопротивления  $W$  стоек, равнопрочных с листами обшивки гофрированной переборки ( $\delta$  — расстояние между гофрами). Высота стойки принимается равной 2,5 м при  $\sigma_t = 2400 \text{ кг}/\text{см}^2$ . В табл. 4 подсчитаны моменты инерции  $I$  и моменты сопротивления  $W$  гофров с различными конструктивными параметрами.

Из этих таблиц видно, что первый тип гофров при  $I=1 \text{ мм}$  не удовлетворяет условиям равнопрочности, размеры других гофров из этих условий могут быть снижены. Для таких гофров из табл. 4, изложенных в табл. 3, в качестве исходных данных приняты Правила Регистра СССР изд. 1956 г.).

Рассмотрим влияние изгибающей деформации бимсов на прочность легких выгородок. Имеются в виду выгородки, установленные в плоскости центральной рамки. Напряжения в свободных консолях бимсов в середине пролета и просадка бимсов сечениями в табл. 5 (в качестве исходных данных приняты Правила Регистра СССР изд. 1956 г.).

В качестве расчетной схемы принималась балка (бимс), упруго заделанная по концам ( $\kappa=0,5$ ) и загруженная равномерно распределенной нагрузкой.

Для такой балки изгибающие моменты и прогибы будут соответствовать раме:

$$M_{\text{изг}} = \frac{QI}{8} \left( 1 - \frac{2}{3} x \right); \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{5}{384} \frac{QI}{EI} \left( 1 - \frac{4}{5} x \right); \quad (8)$$

на опоре

$$M_{\text{изг}} = \frac{QI}{12} x. \quad (9)$$

Так как  $Q=AL_{\text{пл}}$ , а  $I=b\delta^3$ , то прогиб не будет зависеть от пролета и поэтому изгибающие моменты бимсов можно производить только для  $I=0,338$ .

Таблица 5

## регламентарные Правилами Регистра ССР

$\frac{E}{M}$	$\frac{N}{M}$	$\frac{M}{M}$			$\frac{M}{M}$			$\frac{M}{M}$	
		$\frac{M}{M}$			$\frac{M}{M}$				
		$E = 0,50$	$E = 0,333$	$E = 0,250$	$E = 0,50$	$E = 0,333$	$E = 0,250$		
$\frac{E}{M}$	$\frac{N}{M}$	$\frac{M}{M}$	$\frac{M}{M}$	$\frac{M}{M}$	$\frac{M}{M}$	$\frac{M}{M}$	$\frac{M}{M}$	$\frac{M}{M}$	
0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	
50	9	2,02	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	0,85	0,5	0,5	
50	11	6,65	8,57-8,8	7,00 <sup>2</sup> -8,2	7,02 <sup>2</sup> -11	0,95	0,64	0,59	
100	13	6,55	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,53	
100	15	30	7,57-8,8	5,00 <sup>2</sup> -8,2	5,05 <sup>2</sup> -11	1,40	0,72	0,58	
200	17	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,80	0,98	0,89	
200	19	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,40	0,72	0,60	
300	21	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
300	23	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500	25	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500	27	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000	29	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000	31	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000	33	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000	35	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
3000	37	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
3000	39	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000	41	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000	43	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000	45	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000	47	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000	49	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000	51	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000	53	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000	55	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000	57	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000	59	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000	61	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000	63	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000	65	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000	67	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000000	69	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000000	71	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000000	73	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000000	75	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000000	77	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000000	79	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000000	81	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000000	83	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000000	85	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000000	87	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000000	89	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000000	91	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000000	93	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000000	95	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000000	97	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000000	99	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000000	101	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000000	103	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000000000	105	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000000000	107	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000000000	109	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000000000	111	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000000000	113	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000000000	115	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000000000	117	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000000000	119	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000000000	121	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000000000	123	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000000000	125	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000000000	127	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000000000	129	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000000000	131	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000000000	133	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000000000	135	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000000000	137	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000000000	139	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000000000000	141	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000000000000	143	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000000000000	145	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000000000000	147	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000000000000	149	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000000000000	151	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000000000000	153	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000000000000	155	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000000000000	157	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000000000000	159	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000000000000	161	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000000000000	163	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000000000000	165	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000000000000	167	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000000000000	169	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000000000000	171	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000000000000	173	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000000000000	175	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000000000000000	177	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
1000000000000000	179	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000000000000000	181	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
2000000000000000	183	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000000000000000	185	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
5000000000000000	187	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000000000000000	189	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
10000000000000000	191	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000000000000000	193	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
20000000000000000	195	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000000000000000	197	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
50000000000000000	199	10,00	7,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000000000000000	201	17,7	8,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
100000000000000000	203	13,3	8,57-8,8	4,33 <sup>2</sup> -8,2	0,55 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000000000000000	205	15	10,57-8,8	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
200000000000000000	207	30	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,02 <sup>2</sup> -11	1,20	0,68	0,58	
500000000000000000	209	3,00	4,57-5,5	2,00 <sup>2</sup> -8,2	2,				

Таблица 8

Значения  $b_1$  для гофрированных переборок

$L, \text{м}^2$	$L, \text{м}$	$b_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{b_2}{48T_1}} + \sqrt{\frac{b_2}{b_1} - \frac{1}{16}}$			
		$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
398	3,00	3,54	4,23	4,68	5,00
943	3,66	3,50	4,18	4,62	4,97
1890	4,33	3,46	4,13	4,57	4,90
3780	5,00	3,37	4,02	4,45	4,79
6700	5,66	3,30	3,94	4,35	4,69
11 000	6,33	3,26	3,90	4,30	4,63
18 900	7,00	3,19	3,88	4,23	4,63

Таблица 9

Значения напряжений в гофрированных переборках от изгиба бимсов

$L, \text{м}$	$\kappa = \frac{\pi}{A}$	$\kappa = \frac{\pi^2 E}{4I_1 \cdot 10^6}$	$L, \text{м}$	$\kappa = \frac{\pi}{A}$	$\kappa = \frac{\pi^2 E}{4I_1 \cdot 10^6}$
50	$16,3 \cdot 10^{-5}$	-362	140	$28,4 \cdot 10^{-5}$	-600
80	$18,2 \cdot 10^{-5}$	-362	160	$28,4 \cdot 10^{-5}$	-600
120	$23,6 \cdot 10^{-5}$	-485	180	$28,0 \cdot 10^{-5}$	-600
130	$26,1 \cdot 10^{-5}$	-550			

Таблица 10

Значения краевых напряжений в пластинах гофрированных переборок, МПа

$a, \text{мм}$	$a^*, \text{мм}$	$L, \text{мм}$			
		1	2	3	4
250	250	181	720	1630	2500
350	350	99	360	800	1400
450	370	58	230	530	930

Таблица 11

Значения критических напряжений для гофрированных переборок, МПа

Форма гофра	$t = 1 \text{ мм}$	$t = 2 \text{ мм}$	$t = 3 \text{ мм}$	$t = 4 \text{ мм}$
	90	145	—	—
	—	230	230	230

Приложение

Форма гофра	$t = 1 \text{ мм}$	$t = 2 \text{ мм}$	$t = 3 \text{ мм}$	$t = 4 \text{ мм}$
	—	400	—	—
	—	—	1400	1400

значение жесткостей  $k_1$  ( $k_1 = \frac{b_1}{16F}$ ). Моменты инерции бимсов выбирались из табл. 5.

Из табл. 8 видно, что конструкция легких выгородок представляет собой весьма податливое основание (характеристика

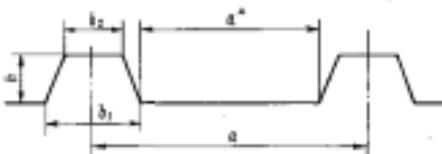


Рис. 2. Заслонка сечения гофрированной переборки

$\kappa = 3,5 - 4,5$ ). В связи с этим можно предположить, что поперечные деформации бимса полностью воспринимаются конструкцией выгородки в виде продольной деформации ее элементов.

Величины продольных напряжений в элементах легких выгородок, расположенных в верхнем или нижнем тэндере, могут, очевидно, быть определены расчетом. О порядке этих величин можно судить по данным табл. 9. Напряжения, приведенные в этой таблице, рассчитаны из условия восприятия продольной деформации равномерно по всей высоте конструкции. В действительности, очевидно, верхняя часть элементов выгородки будет напряжена больше.

Как видно из табл. 10 и 11, возникающие в конструкции легких выгородок продольные сжимающие напряжения могут превышать критические напряжения элементов в пластинах

Таблица 12

легких выгородок. Учитывая это, для легких выгородок на судах длиной 100 м и более следует применять соответствующие расстояния между стойками ( $s$ ) при толщинах листов ( $t$ ), указанных в табл. 10.

Устойчивость гофров первого и второго типов, очевидно, не удовлетворяет условиям достаточной прочности в пределах рассматриваемой расчетной схемы.

Рассмотрим влияние перекоса шпангоутной рамки на прочность легких выгородок. При этом будем полагать, что 1) перекос вызывается склонами, возникающими при общем скручивании корпуса судна (на всем курсе относительно бега волны);

2) форма распределения скручивающего момента принимается в соответствии с рис. 3.

$$M_{sp} = \frac{M_{max}}{2} \cdot \frac{L}{t}, \quad (10)$$

Рис. 3. Эпюра скручивающего момента.

где  $M_{max}$  — интенсивность распределения  $M_{sp}$ .

Величина  $M_{sp}$  оценивается по следующей приближенной формуле

$$M_{sp} = 4,5 \cdot 10^{-3} LB^3. \quad (11)$$

На основании [108], [109] величина скручивающего момента, приходящегося на ширину ( $S$ ) и уравновешиваемого за счет жесткости шпангоутной рамки, может быть определена следующим образом

$$M_{sp-1} = M_{max} \left( 1 - \frac{S}{0,5L} \right) \quad (12)$$

$$M_{sp-n-1} = \frac{M_{sp-1}(0,5L - S)}{2} = \frac{1}{2} M_{sp} \left( 1 - \frac{S}{0,5L} \right) \times \\ \times 0,5L \left( 1 - \frac{S}{0,5L} \right) = M_{sp} \left( 1 - \frac{S}{0,5L} \right)^2. \quad (13)$$

Тогда

$$\Delta M_{sp} = M_{sp} \frac{S}{0,5L} \left( 2 - \frac{S}{0,5L} \right).$$

Величины усилия от скручивания (табл. 12), передающегося через палубу на бортовые шпангоутные ветви, рассчитаны по выражению

$$T = \frac{M_{sp}}{2B}. \quad (14)$$

Величины усилий  $T$ 

$L$	$B$	$H$	$LB^3$	$\frac{M_{sp}}{45 \cdot 10^{-3} \cdot 2B}$	$\frac{S}{0,5L}$	$\frac{\Delta M_{sp}}{45 \cdot 10^{-3} \cdot (2 - \frac{S}{0,5L})}$	$T = \frac{\Delta M_{sp}}{2B}$
$s$	$t$	$n$	$n^2$	на	—	на	на
Однотактные суда							
20	5	1,67	$2,5 \cdot 10^9$	11,25	—	—	—
30	6	2,5	$6,45 \cdot 10^9$	29	—	—	—
40	7	3,34	$13,6 \cdot 10^9$	61,25	—	—	—
50	8	4,17	$25,5 \cdot 10^9$	115	—	—	—
60	9	5	$43,5 \cdot 10^9$	196	0,020	7,8	0,78
70	10	5,83	$70 \cdot 10^9$	315	—	—	—
80	11	6,65	$106,9 \cdot 10^9$	477,5	0,016	11,5	0,86
90	12	7,5	$150 \cdot 10^9$	675	—	—	—
100	13	8,33	$220 \cdot 10^9$	990	0,014	27,5	1,65
110	14	9,15	$302 \cdot 10^9$	1390	—	—	—
120	15	10	$410 \cdot 10^9$	1845	0,012	44,0	2,20
130	16	10,8	$530 \cdot 10^9$	2380	—	—	—
Двухтактные суда							
80	8	4,17	$25,5 \cdot 10^9$	115	—	—	—
60	9	5	$43,5 \cdot 10^9$	196	0,020	7,8	0,78
70	10	5,83	$70 \cdot 10^9$	315	—	—	—
80	11	6,65	$106,9 \cdot 10^9$	477,5	0,016	11,5	0,86
90	12	7,5	$150 \cdot 10^9$	675	—	—	—
100	13	8,33	$220 \cdot 10^9$	990	0,014	27,5	1,65
110	14	9,15	$302 \cdot 10^9$	1390	—	—	—
120	15	10	$410 \cdot 10^9$	1845	0,012	44,0	2,20
130	16	10,8	$530 \cdot 10^9$	2380	—	—	—
140	17	11,7	$650 \cdot 10^9$	3090	0,011	58,0	2,9
150	18	12,5	$870 \cdot 10^9$	3820	—	—	—
160	19	13,5	$108 \cdot 10^9$	4900	0,010	58,0	3,7

Относительный перекос  $\gamma$  шпангоутных ветвей верхнего трансекта как результат их неизвестного изгиба под действием сил  $T/2$  рассчитывается по условной расчетной схеме, приведенной на рис. 4, и равен

$$\gamma = \frac{L}{A}, \quad (15)$$

где

$$A = \frac{1}{2} TA^2 \\ \delta = \frac{3E I_{max}}{3E I_{min}};$$

$A$  — высота трансекта, равная 2,5 м;

$I_{max}$  — момент инерции шпангоута.

Оценка величин  $\gamma$  производится в табл. 13.

Таблица 13

Значения величин  $\tau_3$  для шлангутовых рам, размеры которых взяты из Правил Регистра ССР

$L$	$W_1$	$W_2 = 0,8 \frac{L}{0,6}$	$I$	$T_3$	$\tau_3 = \frac{0,57TA^2}{M_0I}$	$\tau = \frac{\tau_3}{A}$
$m$	$m^2$	$m^3$	$m^4$	$m$	$m^2$	$m$
60	30	56		0,38	$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,36 \cdot 10^{-4}$
80	118	98		0,48	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$
100	178	362		0,62	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,32 \cdot 10^{-4}$
120	238	792		0,74	$0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-4}$
140	417	423		1,05	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,19 \cdot 10^{-4}$
160	580	548		1,36	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,06 \cdot 10^{-4}$
180	728	906		1,75	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$0,06 \cdot 10^{-4}$

Предполагается, что перенос у шлангутовой рамки полностью воспринимается конструкцией легкой выгородки в виде сдвиговой деформации. При этой возникают соответствующие касательные напряжения слоя  $\tau_2 = \sqrt{G}$ , которые следует сравнять по величине с эйлеровыми касательными напряжениями пластины легкой выгородки, равными

$$\tau_2 = 1140 \left( \frac{100T}{\pi^2} \right)^{1/4}$$

Значения действующих и эйлеровых касательных напряжений приведены в табл. 14, 15.

По этим данным можно сделать вывод о незначительности влияния переноса шлангутовых рамок на прочность легких переборок.

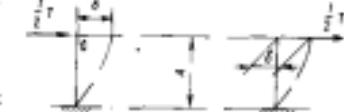


Рис. 4. Расчетная схема при первом шлангутовом разрезе.

Таблица 14

Значения  $\tau_3$  в переборках

$L, m$	$\tau$ из табл. 13	$\tau = ?$	$L, m$	$\tau$ из табл. 13	$\tau = ?$
60	$0,38 \cdot 10^{-3}$	31	148	$0,39 \cdot 10^{-4}$	7,3
80	$0,2 \cdot 10^{-3}$	16,2	160	$0,06 \cdot 10^{-4}$	6,5
100	$0,17 \cdot 10^{-3}$	13,7	180	$0,06 \cdot 10^{-4}$	4,9
120	$0,14 \cdot 10^{-3}$	11,5			

Таблица 15

Значения  $\tau_3$  в пластинах переборок,  $kg/cm^2$

$L, m$	$\tau, kg/cm^2$			
	1	2	3	4
210	258	1030	2320	4140
300	327	514	1140	2200
370	63	328	760	1330

Таким образом, в качестве основных критериев для назначения конструктивных параметров металлических легких выгородок могут быть принятые: 1) расстояние между стойками; 2) длина судна.

## Глава II

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИМАСС В ЛЕГКИХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

#### § 3. Изготовление легких судовых конструкций из пластимасс

Преимущество пластмассовых надстроек, рубок и переборок перед металлическими было доказано непосредственно в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации целого ряда таких конструкций.

Опубликованые в иностранной литературе сведения о применении пластмасс в легких судовых конструкциях сводятся, в основном, к общим описаниям или к возможности использования тех или иных материалов.

Фирма «Уайт» изготавливает надстройку сторожевого корабля из стеклопластика. Длина надстройки 7,55, ширина 4,25, высота 3,05 м. Для изготовления надстроек капотов и небольших спасательных судов был применен композитный материал, состоящий из тонких слоев деревянного шпона и слоя эластичной, или легкой металла, а также легкого заполнителя.

В иностранной литературе имеются сведения о двух материалах, нашедших применение для изготовления легких переборок и выгородок и показавших хорошие эксплуатационные качества. Это пластмасса типа Гламерит, представляющая собой стеклопластик на основе крезолформальдегидной смолы, изготовленный методом горячего прессования (шапоильон — стеклянный мат, выполненный из перекрещивающихся полосок). Переборки из стеклопластика типа Гламерит изготавливаются, в основном, в виде панелей. Внутренняя полость может заполняться легкой звуко- и теплоизоляционной массой, а также использоваться для проходов тросов. Наружные слои переборок, в случае необходимости, выполняются из листов с прессованной бумагой различных расцветок, т. е. обеспечивается декоративная отделка.

На судах заграницей постройки (например, на американском лайнере «US») в качестве материала для переборок применяется Маринит. Маринит — материал, обладающий высокими

термо- и звукоизоляционными свойствами, изготавливается в виде плит из асбестового волокна с неорганическими связующими. Маринит легок, негорюч, может обрабатываться обычными столярными инструментами. Окраска плит производится так же, как отштукатуренных стен.

В английском судостроении легкие переборки и выгородки на некоторых судах выполнены из холопласти — материала, изготовленного из крафт-бумаги (пропитанной фенольными смолами и спрессованной при высоких давлениях и температуре).

В Советском Союзе имеется определенный опыт по изготовлению и эксплуатации легких судовых конструкций из пластимасс.

В настоящее время эксплуатируются и находятся в серийной постройке теплоходы на подводных крыльях типа «Ракета». Рубка теплохода, изготовленная из дурализированной марки Д16-АТ, расположена в средней части над машинным отделением.

К числу основных причин, обусловивших переход этих рубок на изготовление из пластимасс, нужно отнести следующие:

- рубка, лесмотря на свои сравнительно малые габариты, имеет сложную форму, что в случае применения металла приводит к большим и трудоемким гибочным и сборочным работам;

- материал Д16-АТ является трудноизготавливаемым материалом, что усугубляется малыми толщинами обшивки;

- большой объем клянцевых работ, не говоря об их трудоемкости, отрицательно сказывается на внешнем виде рубки;

- и, наконец, сравнительно низкие прочностные требования, предъявляемые к такому типу конструкций.

При выборе элементов конструкции исходили из условия равнопрочности металлической и пластмассовой рубок и обеспеченности равенства их весов.

При толщине обшивки 2 мм в пластмассовом исполнении (удельный вес 1,7 г/см<sup>3</sup>) и 1 мм дурализированном (удельный вес 2,6 г/см<sup>3</sup>) веса рубок равны. Проверка прочности и жесткости показала, что величина стрелки прогиба является определяющей для назначения толщины обшивки рубки, что объясняется малым модулем упругости материала.

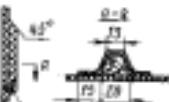
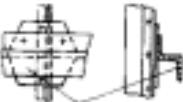
Типовые узлы рубки теплохода «Ракета» в металлическом и пластмассовом исполнении приведены в табл. 16. Общий вид пластмассовой рубки показан на рис. 5.

Теплоходы типа «Ракета» с пластмассовыми рубками эксплуатируются в Северо-Западном речном пароходстве, Северном речном пароходстве, Волжском речном пароходстве, плавают на Днепре (в районе Ростова-на-Дону), в прибрежных водах Черного моря и т. д.

Пластмассовые рубки установлены на плашкоутах (рис. 6). Плашкоуты имеют открытый триум и носовую откидывающуюся

Таблица 16

## Технические узлы металлической и пластиковой рубок

Название технического узла	Металлическая рубка	Пластиковая рубка
Оформление вырезов		
Создание переборки и шпангоута с захвуком		
Окантовка ребер местности верхней рабочей		 $P_m = 12 \times 12$
Создание забора с обшивкой		
Переворотка трюмового и поперечного забора	 $P_m$	 $P_m$
Создание рубки с захвуком		

Условные обозначения:  $K$  — ковать;  $T$  — праформовать;  $T$  — тисковая линия;  $P_m$  — ребро местности.

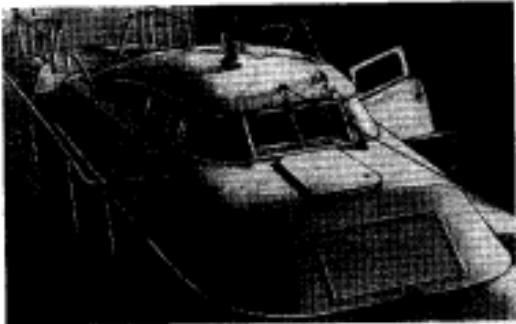


Рис. 5. Образец вид. пластиковой рубки теплохода «Ракета».



Рис. 6. Образец вид. захвуката.

судно. В кормовой части расположено помещение двигателей, над которым находится рулевая рубка, имеющая диаметр 2,2×2,5 м и высоту 2,4 м.

Замена металла стеклопластиком преследовала следующие цели:

- снижение трудоемкости изготовления;
- ликвидацию необходимости в периодических осмотрах, окрасках, специальному уходу;
- применение материала с более высокой коррозионной стойкостью, особенно в условиях жаркого и влажного тропического климата;
- применение материала, более «стойкого» к воздействию различных масел/жиров;
- применение полистирола немагнитного материала.

Пригодный для изготовления рубка стеклопластик изготавливается на основе ненаполненной полизифирной смолы холодного отверждения НПС-609-22М (по СТУ 30-14368-68)

и стеклознаки стекловолокна переклетки марки АСТТ (6) С<sub>2</sub>-О (по МРТУ 6М-836-62).

Обшивка рубки толщиной 7 мм была спроектирована односторонней с прорезями через 400–300 мм набором. Набор состоит из ребер П-образного сечения с заполнителем из пенополистирола ПХВ-1. Для увеличения прочности часть ребра выполнена из стеклопластика ТЖС 0,36-0 по ВТУ85-63

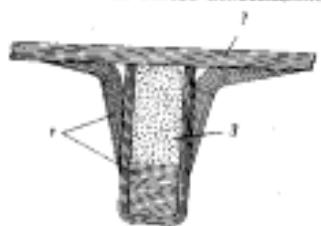


Рис. 7. Ребра жесткости.  
1 — обшивка рубки; 2 — киль; 3 — палубные панели ПСБ-1.

на основе хордовой ткани марки (рис. 7).

На стенах и крыше рубки основа смежных слоев стеклопластика расположена под углом 90°. Все конструктивные элементы в профилях набора и узлах соединений заполнены стеклопластиком, пропитанным слизующим.

Ввиду того что рубка устанавливается на машинном отделении, необходимо было предусмотреть мероприятия по максимальному снижению шума в рубке. Это достигается за счет установки в рубке на расстоянии 250 мм одно от другого двух динамо-изделий: нижнего — металлического и верхнего — пластмассового.

Обшивка рубки изготавливалась контактным способом, для чего предварительно была выполнена матрица.

Общий вид установленной на судно рубки показан на рис. 8.

Плашкоуты с пластмассовыми рубками эксплуатируются в странах с тропическим климатом и в бассейне Балтийского моря.

На большом рыболовном рефрижераторном траулере «Нептун» (рис. 9) установлена пластмассовая кормовая рубка. Рубка (рис. 10) представляет собой цельноформованную трехслойную конструкцию, состоящую из внутренней и внешней обшивок (из стеклопластика на основе полизифирной смолы ПН-1, армированного стеклопластиком АСТТ(6)-С<sub>2</sub>-О) и заполнителя (пенопласт марки ПС-4). Толщина наружного слоя стеклопластика 4, внутреннего 3, заполнителя 100 мм.

Кроме условий прочности, такой выбор определялся и требованиями обеспечения теплоизоляции. С целью снижения горючести материала рубка с внешней стороны была покрыта дополнительным слоем стеклопластика на основе смолы ПН-3.

Наружная обшивка рубки трехслойной конструкции изготавливается на болтанке. В результате выбранной технологии изготовления наружная поверхность рубки имеет отдельные волнистости и шероховатость, что несколько ухудшает ее товарный вид. Впечатление портят и громоздкие конструкции подкреплений под прожектор и крылья мостика.

Вид (в корму) пластмассовой рубки, установленной на БМРТ «Нептун», показан на рис. 11. К палубе судна рубка крепится посредством стального комингса, который предварительно соединяется с обшивкой рубки на заклепках. Представляется, что предусмотренная конструкцией крепления с помощью обычных заклепок не является лучшим вариантом и может вызвать нестабильные дефекты.

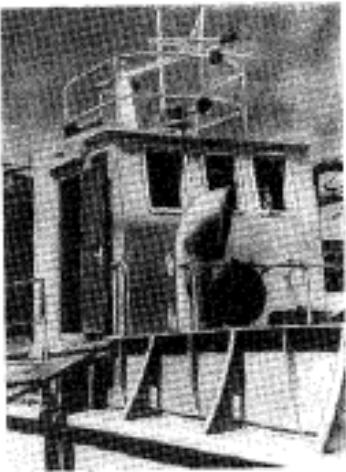


Рис. 8. Общий вид рубки, установленной на плашкоуте.

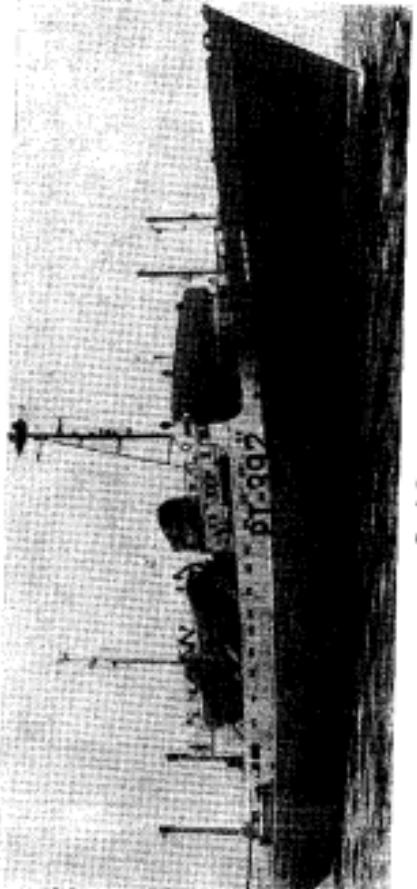


Рис. 9. КМПТ «Нептун».

Для проведения трасс и их креплений внутри рубки предусмотрены специальные углубления в стенах, которые закрываются крышками на шпингах. Это придает хороший вид комещению рубки и несколько сокращает работы по монтажу.

Судно с пластмассовой надстройкой эксплуатируется в суровых условиях Баренцева моря и Северной Атлантики.

Достаточно широко применяются пластмассовые надстройки и рубки на относительно нынешних судах (длиной до 21 м) типа катеров.

В качестве примера можно привести катер, изображенный на рис. 12 (длина 26,6 м, ширина 5,5 м, полное водоизмещение 47,0 т). Его надстройка и рубка (рис. 13) выполнены из стеклопластика, что позволило улучшить остойчивость и выиграть повсюду на архитектурные формы катера.

Катера с пластмассовыми надстройками и рубками эксплуатируются в Черном, Каспийском, Белом морях и на Тихом океане.

В 1960 г. на заводе «Красное Сормово» была спроектирована, изготовлена и установлена на танкере «Рыбинск-ГЭС» пластмассовая рубка.

Танкер эксплуатировался сначала в Волжском речном пароходстве, а затем был передан в Ленское речное пароходство. Несмотря на суровые климатические условия эксплуатации судна, сколько-нибудь заметных дефектов в конструкции рубки не обнаружено.

Следует упомянуть еще об одном типе судна с пластмассовыми надстройками — это морской буксир «КЖ» (рис. 14). Судно предназначено для буксировки несамоходных судов в порту и море и выполнения крановых работ в порту.

При разработке проекта пластмассовой рубки придерживались существующего варианта в отношении формы рубки, расположения оборудования и проходов электротрасс. Поэтому архитектура рубки оставлена без изменения. В качестве



Рис. 10. Расходящееся коромысло пластмассовой рубки из КМПТ «Нептун».

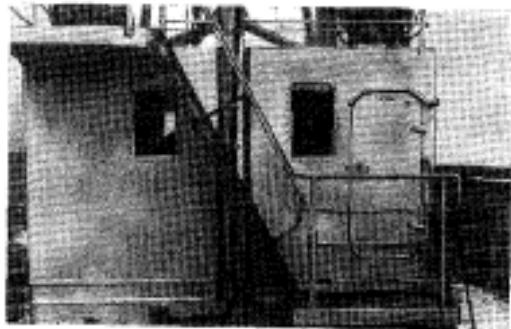


Рис. 11. Вид кормовой пластиковой рубки.



Рис. 12. Катер с пластиковой палубой и рубкой.

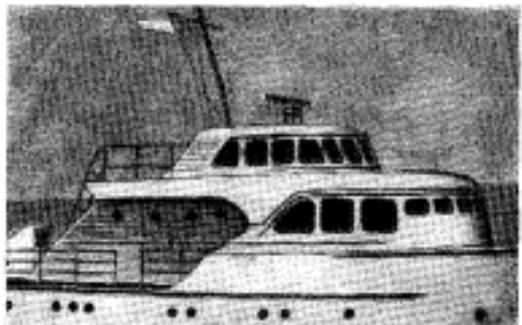


Рис. 13. Пластиковые палубы и рубка катера.

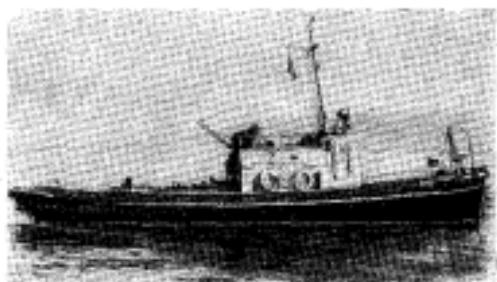


Рис. 14. Морской буксир типа „ЮЖ“.

материала для паружных стенок применен стеклопластик на основе смеси НПС-609-22М и стеклорогожки ТЖС-0-6-0.

Принятый П-образный набор с покосом из кордной ткани и пенопластовым заполнителем хотя и обладает меньшей несущей способностью по сравнению с аналогичным тавровым, но более технологичен в изготовлении и при установке изоляции.

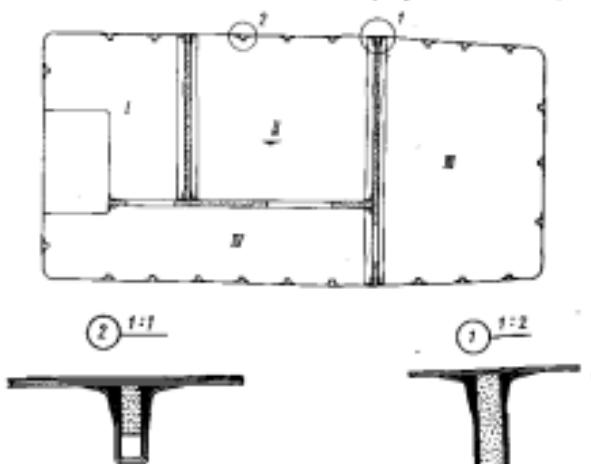


Рис. 15. План расположения выгородок в рубах букона «ЮК» и узлы крепления выгородок (узел 1) к ребер жесткости (узел 2).

1 — сапун; II — кильбук; III — зажим рубка; IV — картер.

Ввиду конструктивных трудностей шахта дымоходов и трубы, к стенке которой крепится букингий гак, оставлена в металлическом исполнении. Соединение шахты с рубкой осуществляется с помощью болтов.

Соединение рубки с палубой букона выполнено на болтах, для чего на палубу букона был установлен компакт высотой 170 мм по всему периметру рубки.

Выгородки в рубке имеют трехслойную конструкцию с наружными слоями из стеклопластика и заполнителем из ППУ-3с. План расположения выгородок пластмассовой рубки букона «ЮК» и узлы крепления ребер жесткости представлены на рис. 15.

Все внутреннее насыщение крепится с помощью приформовки. Насыщение на внешних стенах и крыше крепится с помощью клееватого соединения, за исключением трапов и шторы-поручней, которые дополнительно крепятся преформовкой.

Наружная обшивка рубки изготавливается методом контактного формования. Набор и внутренние переборки изготавливаются на специальной оснастке и устанавливаются в корпусе рубки до выемки ее из матрицы.

Снижение веса пластмассовой рубки по сравнению со стальной с учетом, что кроме корпуса из стеклопластика изготавливаются также фальштруба, фундамент под оборудование, часть деталей, крепление насыщения и легкие двери, составляет примерно около 670 кг. Это позволило убрать с судна часть твердого балласта, наличие которого было вызвано необходимостью повысить остойчивость судна до действующих норм.

Как показывают расчеты, снижение веса рубки позволяет уменьшить твердый балласт на 0,9 т, что составляет  $\frac{1}{6}$  его общего количества. При этом водоизмещение уменьшается на 1,37 т, что, как известно, способствует улучшению мореходных качеств судна.

При применении пластмасс для судовых кадстрок и рубок одновременно выполняются на пластмассе и все переборки, выгораживающие в них помещения.

Пластмассовые переборки устанавливаются и в корпусе судна. Так на теплоходе «Ленинск-Испытатель» легкие переборки трехслойной конструкции с пенопластом и сотопластом заполнителями (рис. 16).

Известные преимущества имеют применение пластмасс в легких судовых конструкциях при модернизации и ремонте судов. Каспийское морское пароходство при модернизации лайтера «Ишимбай» в железнодорожный паром широко применяло пластмассы в конструировании легких переборок. В надстройке судна (рис. 17), имеющей большую протяженность, установлены пластмассовые переборки трехслойной конструкции с различного рода заполнителями. Эскиз расположения пластмассовых переборок в надстройке железнодорожного паром приведен на рис. 18.

#### § 4. Результаты испытаний и эксплуатации

Объем внедрения пластмасс в конструкции судовых надстроек, рубок, переборок и настоечные времена еще сравнимо мал. Кроме прочих причин, сказывается тут и недостаточность данных по результатам эксплуатации пластмассовых судовых конструкций в различных условиях плавания, что влечет за собой неточность в выборе конструктивного и технологического решений.

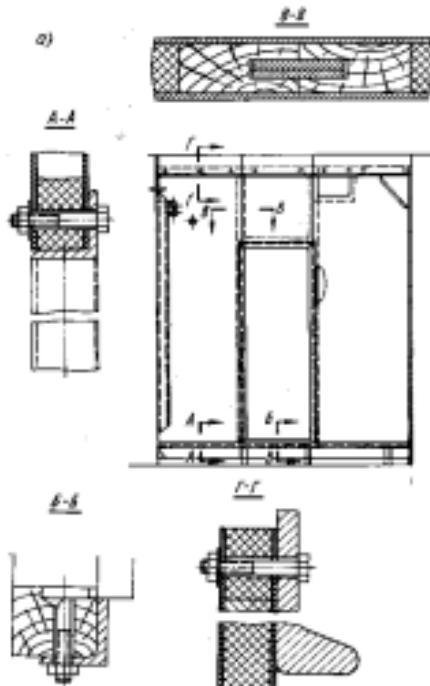
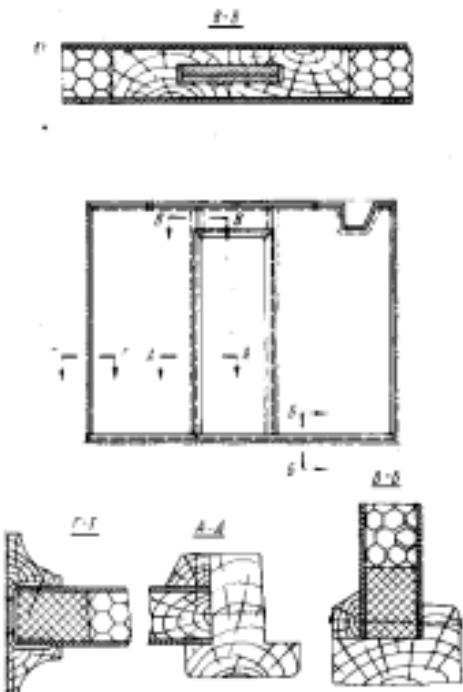


Рис. 16. Переборка трёхслойной конструкции с пенопластом



(а) и оговорок (б) заливка пены в ямы из соединения.



Рис. 17. Надстройка судна «Кизимбай».

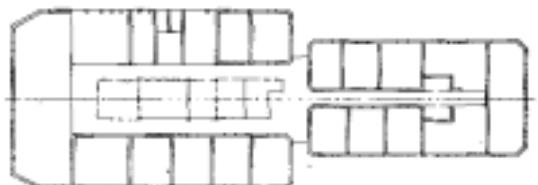


Рис. 18. Расположение пластиковых тереборок в надстройке судна «Кизимбай».

Наряду с обобщением опыта по проектированию и изготовлению пластмассовых судовых конструкций было организовано обследование, а при возможности — проведение определенного комплекса испытаний уже плавающих судов с пластмассовыми надстройками, рубками, переборками.

Пластмассовая рубка теплохода «Ракета» является одной из первых в Советском Союзе судовых конструкций из стеклопластика с такой толщиной материала. Поэтому обследование ее придавалось большое значение. Проводившиеся при этом испытания имели своей целью определение эксплуатационных качеств в сравнении их с данными по металлической рубке.

Испытания проводились по программе, утвержденной Министерством комиссии, и включали в себя:

- визуальный осмотр рубки;
- испытание образца материала рубки;
- статические испытания конструкций рубки;
- вибрационные испытания конструкций рубки;
- определение уровня шума и звукопоглощающих характеристик.

Визуальный осмотр пластмассовой рубки показал, что она выгодно отличается от металлической гладкостью наружной поверхности, отсутствием клепаных швов. Изменение обводов рубки (а несвойственной части), выполненное с целью повышения технологичности, способствовало улучшению общей архитектуры судна.

Испытания образцов материала рубки дали несколько загадочные по сравнению с лабораторными результаты, что может быть объяснено нарушением технологического процесса при ее изготовлении.

Согласно нормам палуба (крыша) рубки, ее предназначеннан для пассажиров, должна быть рассчитана на статическое равномерное распределенное давление в 0,1 м вод. ст. Однако из-за неопределенности условий закрепления и значительной кривизны пластин, образующей крышу рубки, расчетное определение напряжений даже для металлической рубки весьма затруднено.

Самые первые статические испытания пластмассовой и металлической рубок теплохода «Ракета» позволили определить напряжения в прогибах при действии расчетной нагрузки. Для нагружения использовались песок и мелкая галька в мешках. Нагрузка распределялась по крыше рубки равномерно. Нагружение производилось в две ступени: первая ступень соответствовала давлению 0,05 м вод. ст., вторая — расчетному давлению 0,1 м вод. ст.

Кроме того, учитывая возможность проведения работ на крыше рубки во время эксплуатации теплохода, было произведено нагружение сосредоточенной нагрузкой — два человека

(общий вес 140 кг) становились на крышу рубки в ДП судна.

Испытания показали, что напряжения в конструкциях при действии расчетной нагрузки значительно ниже допускаемых. Просьбы из рубки из стеклопластика по абсолютной величине были несколько выше, чем у металлической, но оставались значительно меньше допускаемых. При загружении рубка сосредоточенной нагрузкой напряжения и просьбы не превосходили допускаемых величин.

Конструкции рубки из стеклопластика обладают достаточной прочностью и жесткостью при расчетных нагрузках. Учитывая большой запас прочности, а также относительно низкие механические характеристики пластмассового материала рубки, которая была подвернута испытаниям, представляется возможным в дальнейшем облегчить ее конструкцию.

Определенный интерес представляли испытания узлов крепления леерного ограждения рубки к широкой антенне на крыше рубки. Испытательные нагрузки выбирались в соответствии с условиями эксплуатации этих конструкций. Леерные ограждения нагружались силой в 100 кН, приложенной в районе стойки хвостовой наделки. Нагружение производилось стягиванием поручней ограждения тросом. Нагрузка замерялась динамометром. Замеры напряжений и деформаций производились в районах крепления башмаков двух стоек леерного ограждения и крепления хвостовой наделки к тентовой палубе. Испытания показали, что конструкции узлов крепления стоек леерного ограждения и хвостовых наделок обладают достаточной прочностью и жесткостью для принятой расчетной нагрузки.

При скорости хода судна  $v=60$  км/час давление воздуха на широкую антенну, расположенную на крыше рубки, составляет  $P = \frac{v^2}{2} = 0,00178$  кН/см<sup>2</sup>. При этом на узел крепления передается изгибающий момент в 35 кН·м. Для создания такого момента антenna нагружалась сосредоточенной силой 70 кН на расстоянии 0,5 м от поверхности крыши рубки. Схема загружения и установки тензодатчиков показана на рис. 19. В процессе испытаний измерялись напряжения в обшивке рубки в районе крепления антены. Максимальные напряжения достигали значительной величины — порядка 200 кН/см<sup>2</sup> (сжатие), что составляет примерно 50% от  $\sigma_{\text{сп}}$ . Учитывая знакопеременный

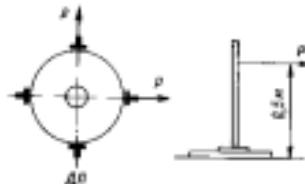


Рис. 19. Схема загружения широкой антены в установке тензодатчиков.

характер нагрузки при эксплуатации судна и отсутствие надежных данных по усталостным характеристикам материала, указанные величины напряжений следует считать нежелательными.

Целью вибрационных испытаний рубок теплоходов типа «Ракета» являлось определение вибрационных характеристик (амплитуд и частот колебаний) конструкций, выполненных из стеклопластика, и сравнение их с аналогичными характеристиками металлической рубки. Измерения вибрации рубок произ-

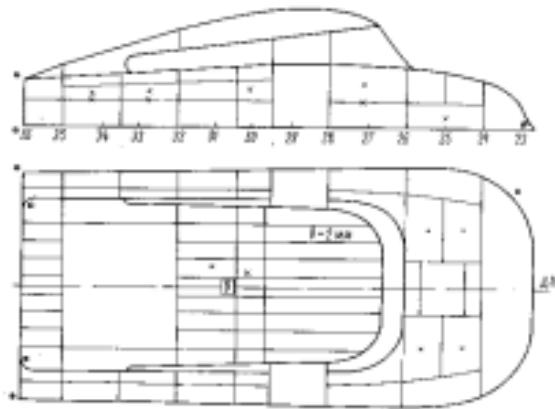


Рис. 20. Места установки датчиков в замерах при вибрациях судна:  
— место измерения изгибающей силы [2] — место установки избыточного.

— место измерения изгибающей силы [2] — место установки избыточного.

водятся во время ходовых испытаний теплоходов (на режимах 1600—1650 об/мин).

Свободные колебания конструкций возбуждаются ударом. Резонансные колебания крыши рубки возбуждаются установившимся на нее электромотором с эксцентриком на валу. Места установки датчиков и замеров показаны на рис. 20.

Частота резонансных колебаний крыши рубки из стеклопластика в районе 31-го шп. по ДП оказалась равной  $\omega = 1200$  кол/мин, амплитуда  $a = 0,25$  мм; для металлической, соответственно, частота  $\omega = 1150$  кол/мин, амплитуда  $a = 0,20$  мм.

Измерение ходовых вибраций крыши рубок показали, что наибольшая вибрация наблюдается на режиме полного хода и происходит с частотой первого порядка (1600—1650 кол/мин).

При этом амплитуды колебаний крыши металлической рубки равны 0,06—0,08 мк, пластмассовой — 0,03—0,05 мк.

Анализ и сравнение результатов измерения вибрации пластмассовой и металлической рубок показали:

— пластиком обшивки обеих рубок имеют одинаковый достаточно высокий запас по частоте относительно возмущающих сил первого порядка, возникающих на корпусе теплохода;

— крыша рубки из стеклопластика поглощает энергию колебаний почти в четыре раза больше, чем клепаная крыша рубки из алюминиевых сплавов. Это позволяет предположить, что амплитуды резонансных колебаний конструкций из стеклопластика при всех прочих равных условиях (одинаковых приведенных жесткостях, массах и возмущающих силах) будут в 3—4 раза меньше, чем у клепанных конструкций из алюминиевых сплавов;

— повышенная вибрация крыши пластмассовой рубки в районе основания антены по сравнению с вибрацией крыши металлической рубки является, по-видимому, следствием недостаточной жесткости крепления антены и продольной направляющей.

Измерения по замерам шума в рубках, выполненных из стеклопластика и алюминиевых сплавов, проводились с целью получения сравнительных акустических данных. Источник шума подавлялся над рубками на расстоянии 0,5 м от верхней части рубок.

Измерения выполнялись в следующем порядке: сначала измерялся уровень шума в рубках и над рубками, затем включалась источники шума и замерялась шумность над ходовыми рубками и в рубках. Таким образом определялась акустонизацию ходовых рубок (рис. 21, а).

При определении структурного шума (рис. 21, б) источник шума устанавливали непосредственно на крышу рубки — это вызывало вибрацию конструкций рубки. Структурный шум измеряли в рубках в тех же условиях и точках, что и воздушный шум.

В результате замеров было получено определенное представление о распространении структурного шума в обеих рубках (общий уровень и частотный характер). Было установлено, что рубка из стеклопластика имеет лучшие показатели по акустонизации, чем рубка из алюминиевых сплавов (соответственно 24 и 20 дБ). Частотная характеристика акустонизации в диапазоне частот 30—8000 Гц как по воздушному, так и по структурному шумам для обеих рубок имеет примерно одинаковое значение (рис. 21).

За состоянием пластмассовых рубок теплоходов типа «Ракета», находившимся в эксплуатации, велись систематическое наблюдение, которое осуществляется как рабочими группами

Межведомственной комиссии, так и сидами экипажей судов. Поступающие сведения говорят о том, что состояния пластмассовых рубок удовлетворительное, серьезных дефектов не имеется.

В Северном речном пароходстве с 1960 г. эксплуатируется теплоход «Ракета» (бортовой номер 23) с пластмассовой руб-

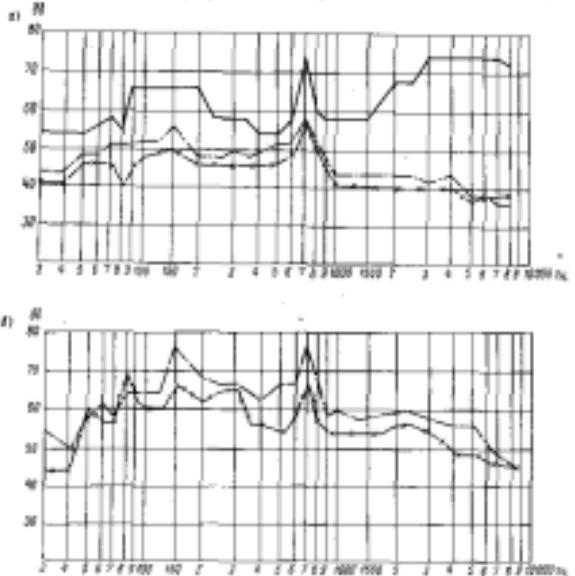


Рис. 21. Частотные характеристики воздушного и структурного шума:  
— — — рубка из листов сплавов № 23 — рубка из пластика; — частота источника шума (голосок ПИФ-6).

кой. Как показали обследований и сообщения Северного речного пароходства, рубки рубок в основном дефектов не имеет, за исключением ступенек с левого борта, которая значительно уменьшилась по толщине в результате стирания стеклопластика. Незначительно повреждены входные двери в средней части маркшейдерской кромки, что произошло, видимо, от ударов о ледяную стойку.

Результаты испытаний

Номер образца	Нагрузка, кг	Прогиб, мм	Разрушающая нагрузка, кг	Величина нагрузки, сопоставленной прогибу в 1 см, кг
1	250	6,09	4100	410
2	250	6,48	4300*	380
3	250	6,48	4200	380

\* Наимен № 2 до разрушения не додались.



Рис. 22. Эскизы конструкции ребер жесткости с установленными антискользящими.

пласт ПХВ-1. Испытания проводились на машине ИПС-200 при температуре 18°C. Образцы испытывались на изгиб по схеме свободно опорной балки с приложенной нагрузкой в середине пролета. Длина пролета 2 м. Нагрузка давалась ступенями до разрушения испытуемых балок. Полная величина нагрузки до 500 кг снималась с дополнительного образцового динамометра (для получения большей точности). Величина прогиба замерялась при нагрузке 250 кг. Кроме того, при прогибе в 1 см отмечалось значение приложенной нагрузки. Результаты испытаний приведены в табл. 17.

Разрушение балок происходит в середине пролета, т. е. в местах приложения нагрузки. В процессе нагружения до 4 т не наблюдалось видимого отслоения проформованного угольника и появление трещин. После разрушения отслоения проформованных угольников локализировались в месте разрушения.

Прочность приформовки отдельных деталей насыщенных проверялась выборочно. Например, мост для трасс электропрово-

доки нагружался усилием в 60 кг (из отрывов), стандартные мачты — нагрузкой 200 кг, приложенной на плечо 500 мм, лестничное ограждение на крыше рубки — путем стягивания в створку ДП усилием 90 кг. Усилие действовало в течение 2 часов. После снятия нагрузки был произведен осмотр. Дефектов в узлах крепления не обнаружено.

Испытание надежности крепления дверей производилось режимом открывания-закрывания их (30—50 раз). При этом между полотном двери и комингсом укладывали резиновый амортизатор. Испытание показало удовлетворительные результаты.

Брызгозащищенность дверей к водозащищенности испытывателей проверялись в соответствии с ГОСТ 3285—55 и оказались достаточными. Для получения данных о состоянии воздушной среды в пластмассовых рубках плавкнута были проведены соответствующие испытания при двух температурных режимах 20 и 50°C.

Анализ проб воздуха, взятых из рубок, показал, что концентрация вредных летучих находится в допустимых пределах.

Обследование пластмассовой рубки плавкнута, более года эксплуатировавшегося в водах Балтики, установлено:

- пластмассовая рубка выгодно отличается от металлической своим внешним видом и удобствами в эксплуатации;
- за время эксплуатации в материале и конструкции рубки не обнаружено никаких повреждений и других дефектов;
- конструктивное оформление крепления лобового стекла неудовлетворительное, жесткость крепления недостаточная.

Признано целесообразным продолжать устанавливать пластмассовые рубки на судах подобного типа.

Пластмассовая рубка трехслойной конструкции, установленная на БМРТ «Нептун», испытывалась во время швартовых

и залобных испытаний судна. В программу испытаний входили:

- наружный осмотр рубки;
- определение некоторых вибрационных характеристик (амплитуда колебаний) стенок и крыши рубки при работе главных и вспомогательных двигателей судна;
- проверка браунингированности дверей и плюминаторов путем их колебания.

Внешний вид рубки хороший, поверхность гладкая. Однако несколько тяжеловато выглядят конструкции подкреплений под проекцию и крыши мостики.

Задоры амплитуды колебаний крыши и стенок рубки при работе главных и вспомогательных двигателей производились в различных точках. Величины амплитуды колебаний стенок пластмассовой рубки не превосходят 0,06 м, крыши — 0,02 м, что значительно меньше аналогичных показателей для металлической рубки.

При полные дверей и плюминаторов водой из брандсбоята с определенного расстояния следов воды внутри рубки не обнаружено.

Около трех лет судно «Нентум» находилось в донеского-промышлених рейсах в районах Баренцева моря и Северо-Западной Атлантики (Гренландия, банка Джорджа, Лабрадор). Составление моря во время поиска 3—5 баллов, временами до 9 баллов, ветер до 11 баллов, температура наружного воздуха от +25 до —40°С. Временами рубка покрывалась водой и обледеневала.

Рубка регулярно обследовалась при заходах в порт прописки. Ни наружной и внутренней поверхностях стенок, крыши и подволоки никаких дефектов не обнаружено. Общее состояние рубки хорошее. За время эксплуатации рубка не ремонтировалась. Командой судна указано на то, что двери рубки же обеспечивают герметичности ввиду плохой адгезии уплотнительной резины к стеклопластикам.

Один из катеров с пластмассовыми надстройками и рубкой (см. рис. 12)веден в эксплуатацию в июне 1965 г. Катер эксплуатировался в Каспийском море в условиях волнения моря 2—3 балла, но неоднократно попадал в более жесткие условия (волнение моря 4—6 и даже более 6—8 баллов). Температура поверхности надстройки доходила до 50°С. Общее состояние пластмассовой надстройки (с рубкой) после эксплуатации (при моторесурсе 650 час. отработано 440 час., аройдано 6783 миль) как по внешнему виду, так и по внутренней отделке хорошее.

При обследовании были замечены некоторые дефекты, которые сводились к следующему:

- имеются отдельные вздутия обшивки надстройки (площадью до 3 см<sup>2</sup>) по левому и правому бортам;

— обшивка палубы парадного мостика имеет недостаточную жесткость и прогибается между набором (даже при загрузке на мостике одного человека);

— угловое соединение рубки с палубой надстройки в одном районе выполнено некачественно (стыковаты угольники узкими перегородками, имеются отслоения угольника, привинченные к преградкам, винтный вид неудовлетворительный).

С целью улучшения эксплуатационных качеств пластмассовой надстройки (с рубкой) рекомендуется:

- при изготовлении пластмассовых надстроек на катерах предусматривать наружный декоративный слой (белый);
- увеличить жесткость палубы парадного мостика и настила на ее местные покрытие;
- улучшить конструкцию уплотнения дверей и плюминаторов, обеспечив надежность службы уплотняющих архивида;
- заменить для стока воды выполнить из стеклопластика, заменить механическое соединение его с рубкой kleевым;
- предусмотреть открывающийся плюминатор и агрегат на левом борту;
- в комплект рубки добавить ветроуловители для плюминаторов.

Катера с пластмассовыми надстройками плавают в Черном и Белом морях, Тихом океане. Сообщения, поступающие от команд, свидетельствуют о хорошем состоянии пластмассовых надстроек.

Составление пластмассовой рубки танкера «Рыбисса-ГЭС», находящегося в эксплуатации с 1960 г. на сибирских реках, хорошее. Замечаний у экипажа нет.

Танкер «Ленинск», на котором были установлены трехслойные пластмассовые переборки, после почти годичного плавания вернулся в порт прописки. За этот период судно совершило рейсы в Антарктику, Голландию, на Кубу и в Индию. Осмотр установлено, что переборки (наружные слои из стеклопластика, заполнитель сетчатый и лекопластичный) находятся в хорошем состоянии, видимых повреждений — наружных трещин, вмятин, бухтановатостей — не обнаружено. Наружных дефектов в креплениях предметов оборудования такие нет. По мнению команды, звукоизоляционные свойства переборок трехслойной конструкции не ниже, чем у обычных деревянных.

## Глава III ПЛАСТИМССЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕГКИХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### § 5. Общие сведения

Пластмассы обладают множеством ценных свойствами, что предопределило их широкое применение в судостроении. Так, например, удельный вес конструкционных пластмасс колеблется от 0,9 до 1,6  $\text{г}/\text{см}^3$  и в среднем составляет 1,4  $\text{г}/\text{см}^3$ , т. е. в среднем он в пять раз меньше, чем у черных и цветных металлов, и в два раза меньше, чем у алюминиевых сплавов.

Имеются пластмассы с удельным весом, доходящим до 0,01  $\text{г}/\text{см}^3$  — так называемые газонаполненные материалы. Они применяются в промышленности для тепло- и звукоизоляции, их используют при изготовлении различных покрытий, спасательных средств и в качестве заполнителей.

Одним из основных свойств пластмасс является возможность применения прогрессивных методов переработки их в изделие. Литье, прессование, литье под давлением, напыление, контактное формование — все эти методы переработки пластмасс позволяют получить изделия любой формы с минимальными отходами. При необходимости пластмассы могут подвергаться и механической обработке — резке, сверлению, шлифованию и т. п.

Общим признаком для большой группы пластмасс является изотропность их физико-механических свойств. Однако физическая сущность однородности свойств различных изотропных пластмасс различна. Такие пластмассы, как поливинил, политетрафторэтилен, винилпласт, фторопласт и др., имеют однородное структурное строение: они являются гомогенной упругой средой, состоящей из макромолекул полимера или соединения, хаотично ориентированных в объеме материала. Такие пластмассы обладают гомогенной изотропной физико-механическими свойствами.

Пластмассы другой большой группы — наполненные — также могут быть изотропными, хотя они имеют неоднородное физическое строение, например пластмассы, наполненные равномерно диспергированным в полимере наполнителем. Присутствие равномерно распределенных в объеме полимерной сетки нанесенных частиц наполнителя не изменяет изотропности свойств связующего, но оказывает влияние на количественные значения физико-механических характеристик. Такое физическое строение имеют пластмассы, наполненные дезориентированными волокнами.

Прочность наполненных пластмасс зависит от физико-механических свойств связующего и наполнителя. Бывает, что прочность наполнителя выше прочности связующего и последний отличается высокой адгезией к наполнителю. В этом случае прочность пластмассы повышается. Если адгезия связующего с наполнителем плоха или низка прочность наполнителя, то механические свойства материала не повышаются. Однако введение наполнителя может приводить и другие цели, например повышение фрикционности, виброблокировки, снижение стоимости материала.

Анизотропия физико-механических свойств гетерогенные и гомогенные пластмасс также может носить различный характер. Если неизотропные (простые или композиционные) пластмассы имеют преимущественную ориентацию молекул, так как число химических связей в одном из направлений оказывается преобладающим, то они будут обладать гомогенной (одинаковой для любой точки материала) анизотропией свойств.

Наполненные пластмассы, в которых наполнитель ориентирован определенным образом, такие анизотропны, но в отличие от предыдущих таких пластмасс обладают гетерогенной анизотропией физико-механических характеристик. Следует заметить, что в обоих этих случаях анизотропия носит микроструктурный характер.

Однако существует целая группа высокопрочных конструкционных пластмасс, анизотропия механических свойств которых имеет не микроструктурный, а конструктивный характер. К таким материалам, например, относятся стеклопластики.

Варьируя схемы и углы армирования, соотношения взаимно перекрещивающихся слоев текстуры, армированные стеклопластиками можно предавать любую желаемую анизотропию механических характеристик, т. е. можно конструировать анизотропно прочностных свойств материала. По природе связующего различают эпоксидные, эпоксидные, фенотифоромальдегидные, кремнийорганические и другие стеклопластики.

Полиэфирные смолы представляют собой растворы ненасыщенных полиэфиров молекуларного веса в мономерах и олигомерах, способных к полимеризации.

Полиэфирные смолы используются главным образом в качестве связующих холодного и горячего отверждения для армированных пластиков, в частности стеклопластиков, а также в качестве лаков, заделочных составов, краек, флюсов для пайки, компонентов цаплевок и т. д.

Эпоксидные смолы представляют собой полимеры линейного строения, содержащие в своей структуре концевые эпоксидные группы. У эпоксидных смол хорошая адгезия к стекловолну волокну, незначительная усадка при отверждении, высокие диэлектрические свойства, но высокая стоимость (в 3—5 раз дороже полиэфирных).

Фенолформальдегидные смолы малы применены для изготовления стеклопластиков разные, чем все другие связующие. Конструкционные стеклопластики на основе фенолформальдегидных смол отличаются высокой теплостойкостью и значительной жесткостью, поэтому они широко применяются в авиации и ракетной технике. Для получения изделий из стеклопластика на основе фенолформальдегидных смол необходимо иметь соответствующие пресс-формы, так как отверждение этих смол происходит при повышенном давлении и температуре 150—180°C.

Кремнийорганические смолы применяются для получения стеклопластиков, отличающихся высокой теплостойкостью в сочетании с высокими диэлектрическими свойствами и водостойкостью. Недостатком кремнийорганических смол является их высокая адгезия к стекловолну волокну, снижающая механическую прочность.

В качестве армирующего материала для стеклопластиков применяют различного рода стекломатериалы.

Использование стекловолнового волокна и материалов на его основе в качестве наполнителя объясняется тем, что стекловолокно обладает целым рядом существенных преимуществ по сравнению с другими синтетическими волокнами. Оно отличается большой прочностью на разрыв, имеет высокий модуль упругости, высокие диэлектрические свойства, химическую устойчивость, негорючесть, харитаемость и другие полезные свойства. Прочность стекловолнового волокна на разрыв значительно превосходит прочность большинства других волокон, причем она резко увеличивается с уменьшением диаметра волокна, то это связано с удорожанием материала. Под воздействиенем влаги воздуха, и частично при температурной переработке, волокно теряет прочность и разрушается. Смола в армированной пластике защищает стекловолокно от воздействия внешних разрушающих факторов, связывает волокна, распределяет между ними напряжения, а наполнитель обеспечивает прочность и достаточно высокую жесткость материала в целом.

Большое значение имеет выбор качества и количества связующих стеклопластика, да и других приваренных пластмасс. С понижением содержания смолы, например, увеличиваются вязкостные и пластичности материала, повышаются его диэлектрические свойства, но одновременно снижается механическая прочность, возрастают внутренние напряжения вследствие увеличения количества летучих веществ между слоями связующего и усадки при формировании. Удачные сочетания позволяют получить стеклопластики с высокими механическими характеристиками и при этом сохранить положительные свойства связующих.

Таким образом, пластмассы, армированные стекловолокном, представляют собой новый строительный материал, механические и другие свойства которого можно в значительной степени регулировать.

## § 6. Стеклопластики хладоного отверждения

Стеклопластики, состоящие из арматуры в виде стекловолокна и полимерного связующего (смолы с различными добавками), являются основными судостроительными конструкционными пластмассами.

Широкий диапазон возможных комбинаций стекловолокна в синтетической смоле в сочетании с возможностью изготовления изделий почти любой формы предоставляет большую свободу в разработке наиболее рациональных конструкций.

Полимерной основой сплавящего стеклопластика, используемых в судостроении, в том числе и для рассматриваемых конструкций, служат главным образом непастичные полиэфирные смолы хладоного отверждения, причем количество их как в нашей стране, так и за рубежом постоянно возрастает.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает полизифирные смолы различных марок: ПН-1, ПН-1С, ПН-2, ПН-2С, ПН-3, ПН-3С, ПН-4, ПН-6, ПН-62, ПНС-609-21М, ПНС-609-22М и др. Из них ПН-1 и ПН-2 — смолы общего назначения, содержащие стирол; ПН-3 и ПН-4 — смолы с повышенной теплостойкостью (в отверженном состоянии); ПН-1С, ПН-3С, ПН-6 отличаются повышенной огнестойкостью; ПН-62 же содержит летучего мономера и имеет в отверженном состоянии повышенную теплостойкость и огнестойкость; ПНС-609-21М и ПНС-609-22М — смолы, разработанные для применения в судостроении.

От выбора той или иной смолы зависят не только физико-механические свойства стеклопластика, но и степень токсичности, теплостойкости, поглощаемой и, наконец, технологичности. Выбор способа формования, температурный и силовой режимы переработки стеклопластиков, время технологического цикла определяются в основном типом связующего.

Современная практика постройки и опыт эксплуатации судовых конструкций позволили определить требования к таким смолам, главные из которых сводятся к следующему.

Смолы должны быть нетоксичными. Выделение предно действующих из организма человека веществ, очевидно, наименее нежелательно в период эксплуатации конструкций. В насторожнее время имеется ряд методов борьбы с токсичностью: ходогрев, окраска,ведение добавок и др. Кроме того, опыт показал, что степень токсичности с течением времени существенно снижается. Смолы должны быть негорючими. Ввиду своей природы все поликарбонатные смолы горючие. Путем введение специальных добавок можно получить самозатухающие смолы, однако введение таких добавок, как правило, отрицательно оказывается на механических свойствах стеклопластика. Поэтому самозатухающие смолы целесообразно применять для наружных слоев.

Смолы должны быть теплостойкими. Чувствительность смол к повышению температуры также обусловлена их природой и может быть различной у разных смол. Изискание новых смол и методов повышения их теплостойкости в настоящее время является актуальной проблемой, так как степень теплостойкости смол существенно влияет на механические свойства стеклопластика (главным образом за получесть материалов) и при нормальных температурах.

Смолы должны полностью полимеризоваться. Невыполнение этого условия может привести к весьма неприятным последствиям (снижение механических свойств, расслоение и т. п.), тем более опасным, что надежные методы контроля степени полимеризации отсутствуют, а ухудшение свойств начинается, как правило, по истечении определенного времени. Для обеспечения полной полимеризации необходимыми условиями являются строгое соблюдение технологических режимов формирования конструкции и применение качественных компонентов.

Смолы должны обеспечивать возможность изготовления пластмассовых конструкций необходимых размеров и форм, а также качественную прочность стеклополимеризующего материала и прочное сцепление с ним. Необходимые вязкость в время отверждения смолы обеспечиваются соответствующими добавками. Повышение степени сцепления смолы со стекловолокном (адгезии) достигается специальной обработкой стеклополимеризующих материалов.

Смолы должны иметь следующие физико-механические характеристики:

Удлинение всп. до $\sigma_{\text{пр}}^{\text{вн}}$ , %, не более	1,2—1,4
Предел прочности, $\sigma_{\text{пр}}^{\text{вн}}$ , не менее:	
при сжатии	1200—1500
в распоре	300—600
в скручивании (в плоскости толщины до 0,5 мк)	150—200
Удлинение, %, не менее	6—8

В качестве наполнителя стеклопластиков применяется так называемое алюмоборосиликатное стекло в виде различных армирующих материалов: стеклотканей, кордных тканей, стеклоровшиц (стеклослужущих), стекломатов (стеклохолстов).

Стеклоткань сатинового переплетения (например, ткань марки АСТТ(6)-С<sub>2</sub>-О) эластична, хорошо облегает форму и пропитывается смолами, а стеклопластик на основе сатиновой ткани обладает более высокой прочностью.

Кордные ткани изготавливаются как из крученых нитей, так и из некрученых. Нити основы по всей длине не имеют переплетения, связи же между собой осуществляются относительно слабыми связями узла. Стеклопластик, армированный одноволнистной кордной тканью, применяется для усиления связей в определенном направлении.

Жгутовые ткани (стеклорогожки) имеют в качестве центральной оси и утка стеклодут. Значительная толщина рогожек позволяет относительно быстро и легко набирать нужную толщину стеклопластика. Стеклопластик, армированный жгутовой тканью, обладает высокой ударостойкостью.

Стеклохолсты изготавливаются из химически и механически спеченных стекломатериалов. Первые представляют собой хаотически расположенные рублевые волокна, соединенные специальными эмульсиями; вторые — хаотически расположенные волокна, прикрепленные к специальному стеклополистиковой или хлопчатобумажной подкладке. Стеклохолсты значительно дешевле стеклотканей.

В судостроении к этим материалам предъявляется ряд специфических требований, главное из которых заключается в необходимости облицовки и обработки стеклополистик гидрофобно-адгезионными составами. Это мероприятие, наряду с улучшением степени адгезии смолы и стекла, увеличивает стойкость стеклопластика против воздействия влаги. Прочностные и упругие свойства стеклопластика зависят от вида и количества стеклополистикового наполнителя.

Стеклопластики с хаотическим расположением волокон (стекломаты) с удовлетворительной для инженерной практики точностью могут рассматриваться как изотропные. Их механические свойства во всех направлениях одинаковы. Такие материалы целесообразно применять для изготовления конструкций сложной формы и сравнительно неподвижной прочности.

Для конструкций с направленной прочностью и жесткостью применяются материалы с определенной ориентацией волокон (стеклослужущие, стеклоровшицы). Ориентированные стеклопластики позволяют получить конструкции с определенными, западдинными анизотропными свойствами. Такие материалы применяются для изготовления конструкций относительно простой формы, но высокой прочности.

Практически все анизотропные стеклопластики можно рассматривать как трансверсально-изотропные или ортотропные материалы, что обусловлено определенной симметрией их строения. Кроме того, нужно отметить, что судовые конструкции из них являются тонкостенными, а это дает возможность не учитывать напряжений, действующих перпендикулярно направлению пришивания, что в значительной мере упрощает изучение механических свойств стеклопластиков и задачу расчета конструкций из них сводят к плоской задаче теории упругости ортотропных тел.

Существенной особенностью стеклопластиков как конструкционных материалов является их чувствительность к продолжительности действия нагрузки и к воздействию температуры и влажности. Явление ползучести и связанные с ним падение прочности при действии постоянной по величине нагрузки наблюдается у стеклопластиков даже при комнатной температуре. С увеличением температуры и влажности физико-механические характеристики стеклопластика снижаются.

С учетом свойств стеклопластиков и опыта эксплуатации судовых конструкций в настоящее время определен ряд требований, которые должны удовлетворять эти материалы [23], [26].

1. После пребывания стеклопластика в пресной воде не менее 6 месяцев без нагрузки потеря прочности не должна превышать 20% от нижних пределов прочности (растяжение или сжатие). Обычно соблюдение этого условия проверяется кипячением образцов в пресной воде в течение 2 час.

Таблица 18

**Физико-механические характеристики стеклопластика на основе стеклопластика АСТТ(6)-С<sub>2</sub>-О и смолы НПС-609-22М**

Параметр	Виды смол	Параметр	Виды смол
Удельный вес, $\text{с} \cdot \text{см}^{-3}$	1,78 62	Модуль нормальной упругости при растяжении, $\text{кг}/\text{мм}^2$ :	
Содержание стекловолокна, %		по основе	$1,9 \cdot 10^5$
Предел прочности, $\text{kг}/\text{мм}^2$ :		в утку	$1,3 \cdot 10^5$
а) при растяжении	2900 1900	Модуль упругости при сжатии, $\text{kг}/\text{мм}^2$	$0,32 \cdot 10^5$
б) при сжатии	2900 2100	Коэффициент Пуассона:	
по основе		по основе	0,15
в) при сдвиге	1100	в утку	0,10

2. Предел усталости стеклопластиков, найденный по результатам испытаний симметрично нагруженных образцов без надрезов на базе  $10^7$  циклов, должен составлять не менее 25% от табличных пределов прочности материала.

3. Снижение прочности и других свойств стеклопластика при нагревании до 50–60°C же должно превышать соответственно 20–30%.

В качестве примера в табл. 18 приводятся физико-механические характеристики стеклопластика на основе стеклопластики АСТТ(6)-С<sub>2</sub>-О и смолы НПС-609-22М.

### § 7. Пластмассы на основе смол горячего отверждения

Пластмассы на основе смол горячего отверждения имеют ряд преимуществ перед полизэфирными стеклопластиками. Благодаря наличию сырьевой базы и относительно низкой стоимости фенольформальдегидные смолы раньше других смол начали применять для изготовления пластмасс. Пластмассы на основе фенольформальдегидных смол сочетают высокую термостойкость, металлическую прочность и относительно хорошую адгезию к стеклянному волокну.

Однако при прессовании смол этого класса необходимо создавать высокое давление (до 70  $\text{kг}/\text{см}^2$ ), так как в противном случае выделяющиеся при конденсации побочные продукты могут вызвать появление пузырьков внутри материала, его разрушение и т. д. В случае применения высоких давлений ( $1,0$ – $10 \text{ kг}/\text{см}^2$ ) используют модифицированные фенольформальдегидные смолы, которые медленнее отверждаются и поэтому обеспечивают возможность побочным продуктам реакции удаляться из материала.

Модифицируя фенольальдегидные смолы, одновременно удается улучшить адгезию их к стеклянному волокну и повысить механические свойства стеклопластиков.

На основе модифицированных фенольальдегидных смол изготавливают стеклопластиколиты марок КАСТ, ВФТ-С, стекловолоконят АГ-4 и ряд других.

Кремнийорганические соединения благодаря высокой термостойкости, непосприимчивости к повышенной влажности и отличным диэлектрическим свойствам представляют большой интерес для производства стеклопластиков.

Однако следует отметить, что если в производстве стеклопластиков электроизоляционного назначения кремнийорганические смолы используются широко, то для изготовления конструкционного материала они применяются пока ограниченно. Причиной этого являются недостаточная адгезия смолы к стеклянному волокну и сравнительно невысокая прочность связующего.

В ГДР основной промышленный выпуск стеклопластика типа глякразит. Соотношение весовых частей этого материала: стекловолокно — 45; крезольная смола — 45; гипс — 10. Глякразит обладает высокими механическими свойствами, но его достоинствами являются дешевизна, недорогость исходного сырья, легкость.

Таблица 19

**Физико-механические характеристики стеклопластика ЛТС-О**

Показатели	Значение
Объемный вес, Г/см <sup>3</sup> , не более	1,5
Предел прочности при сжатии в кг/см <sup>2</sup> , не менее	800
Удельная удельная твердость, кГ/см <sup>2</sup> , не менее	25
Водонепроницаемость за 24 часа при испытываниях торцах образцов, %, не более	5
Потеря веса при скотчинге по методу отжига трубки, %, не более	10

Стеклопластик марки ЛТС-О представляет собой листовой материал, изготовленный методом горячего прессования стеклолистов, пропитанных смолой, на основе фенольформальдегидной смолы «Б» с добавкой минерального наполнителя — гипса и красителя. Толщина листов этого стеклопластика 2 мм и выше. Физико-механические характеристики стеклопластика ЛТС-О приведены в табл. 19.

Таблица 20

**Физико-механические характеристики ТСП**

Показатели	Значение
Удельный вес, кг/дм <sup>3</sup>	1,4
Предел прочности, кГ/дм <sup>2</sup> :	
при растяжении	900—1300
в сжатии	1400—1600
и изгибе	1000
Удельная удельная твердость, кГ/см <sup>2</sup> :	
для марок ТОД и ТТ	8
и марок ТУН	15
Температура до размягчения, °С	80
Водонепроницаемость, %:	
для марок ТУН	3,0
и марок ТОД и ТТ	4,0
Горючесть (брюк сыно-состоительного горения) окн. не более	30
Потеря веса, %, не более	20

Трудноспасаемый слоистый пластик марок ТОД и ТТ (СТУ 30-14085-63) представляет собой материал, полученный методом горячего прессования специальных бумаг, пропитанных крезольными смолами, и антипригаренной бумагой, пропитанной фенольными смолами. Материал ТОД выпускается

с однотонной декоративной поверхностью различных цветов: белого, голубого, слоновой кости, красного и др. Материал ТТ выпускается с текстурной поверхностью, имитирующей ценные породы дерева и камня: карельскую березу, дуб, орех, малинит, орлан и др. Трудноспасаемый слоистый пластик выпускается в виде листов (1475×975 мм; 975×975 мм) толщиной 2—10 мм.

Пластик марки ТУН (ТУ СП 53-66) представляет собой трохиустойчивый, трудноспасаемый, ударопрочный, нетоксичный листовой материал, получаемый методом горячего прессования специальных бумаг, пропитанных фенольными смолами, и стеклоткань марки Э-0,1 (ГОСТ 8481-61), пропитанной эпоксидозелевыми смолами. Выпускается пластик в виде листов длиной от 975 мм до 1500 мм, шириной до 900 мм, толщиной от 1,5 до 5 мм.

Физико-механические характеристики слоистых пластиков указанных марок приведены в табл. 20.

## § 8. Материалы для изготовления трехслойных конструкций

Трехслойники называются конструкции, состоящие из двух наружных (несущих) слоев небольшой толщины, выполненных из прочного материала, и легкого заполнителя, роль которого заключается главным образом в сохранении заданного расстояния между наружными слоями в течение их в совместную работу, а также, в определенных случаях, в обеспечении тепло- и звукоизоляционных свойств конструкции.

Трехслойные конструкции подразделяются на следующие типы.

По роду заполнителя (рис. 23):

- со сплошным заполнителем — а;
- с сотовым заполнителем — б;
- коробчатые панели — в;
- комбинированные (коробчатые панели с пенопластовым заполнителем) — г.

По материалу наружных слоев:

- с пластмассовыми несущими слоями;
- с металлическими несущими слоями.

По оформлению поперечного сечения:

- симметричные (толщина, пределы прочности и модули упругости наружных слоев одинаковы);

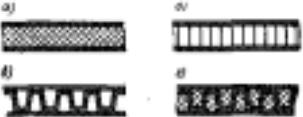


Рис. 23 Типы трехслойных конструкций

— несимметричные (геометрическая асимметрия — толщина наружных слоев неодинакова; физическая асимметрия — пределы прочности и модули упругости неодинаковые).

Сочетания материалов наружных слоев и заполнителя могут быть самыми разнообразными. Выбор того или иного сочетания обуславливается назначением конструкции, способами ее изготовления и т. д.

При выборе материалов несущих слоев (табл. 21) необходимо придерживаться принципа получения наиболее эффективной в весовом отношении конструкции. Этот принцип требует, чтобы удельные жесткости материала несущих слоев и заполнителя были близкими. При этом объемная масса заполнителя должна быть минимальной.

Таблица 21

Материалы для изготовления трехслойных конструкций

Наружные слои	Заполнитель	Примечание
Стеклопластик из основе полизефирной смолы с различными стеклополимерными наполнителями	Пенопласт типа ПХВ-1 Пенопласт типа ППУ	Из термопластов возможна изготовление коробчатых панелей, но стеклопластик ЛТС-О — листов и коробчатых панелей
Стеклопластик из основе эпоксидной смолы с различными стеклополимерными наполнителями	Пенопласт типа ФК-20	
Трехслойный слойстий пластик ТТ	Абобасалт-609 Сотопласты	Пенопласты типа ФБ следует использовать в трехслойных панелях с металлическими наружными слоями
Трехслойный слойстий пластик ТУН		
Двухслойный слойстый пластик		
Стеклопластик типа ЛТС-О		
Термопласты		
Алюминиевомагниевые сплавы		
Сталь		

Однако в настоящее время удельная жесткость заполнителя крайне незначительна.

На рис. 24, 25 приведены сравнительные диаграммы удельных жесткостей и удельных прочностей материалов несущих слоев и заполнителей.

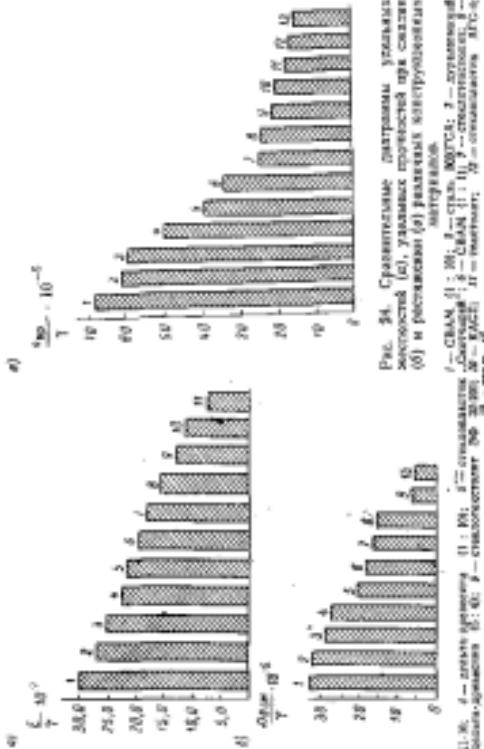


Рис. 24. Сравнительные диаграммы удельных жесткостей (a), удельных прочностей при сдвиге (b) и растворимости (c) различных материалов для слоев (d) и трехслойных (e) панелей из трехслойных материалов:

1 — СПАН; 2 — СПАН; 3 — стеклопластик; 4 — стеклопластик; 5 — стеклопластик; 6 — сталь; 7 — сталь; 8 — керамика; 9 — кристалл; 10 — пластик; 11 — капрон; 12 — полипропилен; 13 — поливинилхлорид; 14 — полистирол; 15 — полиэтилен; 16 — полиэтилен-пропилен; 17 — полипропилен; 18 — поливинилхлорид; 19 — полистирол; 20 — полиэтилен; 21 — полипропилен; 22 — поливинилхлорид; 23 — полистирол; 24 — полиэтилен; 25 — полипропилен; 26 — поливинилхлорид; 27 — полистирол; 28 — полиэтилен; 29 — полипропилен; 30 — поливинилхлорид; 31 — сталь; 32 — алюминий; 33 — керамика; 34 — кристалл; 35 — стеклопластик; 36 — стеклопластик; 37 — трехслойный; 38 — четырехслойный; 39 — пятислойный.

Из диаграммы видно, что удельные характеристики пеноблест и жесткости (сварные стеклосоты, соты из плюмажных сплавов) на порядок меньше, чем у высокопрочных ориентированных стеклосотиков и сталью, и приближаются к удельным характеристикам таких материалов, как стеклотекстолиты типа КАСТ и текстолиты. Этими обясняется высокая эффективность трехслойных конструкций с несущими слоями из стеклопластиков и высокопрочными сотами из заполнителей.

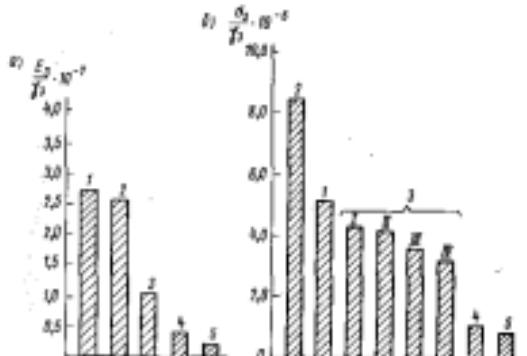


Рис. 26. Диаграммы удельной жесткости (а) и удельной прочности (б) при сжатии заполнителей.

1 — стеклост; 2 — соты из алюминиевых сплавов (без наполнения); 3 — соты из плюмажных сплавов; 4 — пенопласт ПХВ-1; 5 — пенопласт ППС-1.

I — из ткани Э (1,2 см); II — из ткани Т<sub>1</sub> (1,0 см); III — из ткани Т<sub>2</sub> (0,9 см); IV — из ткани Т<sub>3</sub> (0,8 см).

В качестве заполнителей применяются пенопласти, сотопласти и асбосилин-609.

Пенопласт ПХВ-1 (СТУ 9-90-61) представляет собой легкую газонаполненную пластмассу с равномерной, замкнутопористой структурой, изготовленную на основе полипропиленхлорида. Пенопласт ПХВ-1 выпускается в виде прямоугольных плит.

Пенопласт на основе полиуретанов представляет собой легкую газонаполненную пластмассу, получаемую на основе полизифироизиновых композиций. Изготавливают пенопласт на месте применения путем смешивания жидких компонентов (полизифира и смеси ДУДЭГ).

Пенопласт ФК-20 изготавливается на основе фенилформальдегидной смолы. Полуфабрикат пенопласта ФК-20 (СТУ 9-463-62) представляет собой пакет или пленку, обладающую способностью к вспениванию при повышенных температурах. Физико-механические характеристики пенопластов приведены в табл. 22.

Таблица 22  
Физико-механические характеристики пенопластов

Параметры	Пенопласт марка ПХВ-1	Пенопласт марка ФК-20	Твердость в масле гидравлических упругостей
Удельный вес, г/м <sup>3</sup>	0,1—0,13	0,19—0,22	0,2
Прочность при раскалывании, кГ/см <sup>2</sup> :	20,0—24,0	15,0—18,0	20,0
— скотта	6,0—9,0	10,0	30,0
— изгиба	—	8,5	45,0
— изгиба	22,0	—	10,5
Модуль упругости, кГ/см <sup>2</sup> :	800—1000	—	—
— изгиба	185	—	—
Удельная ударная вязкость, кГ·с/см <sup>2</sup>	0,8—1,0	1,0—1,1	1,2
Водоупорение за 24 часа, %	1,5—2,0	1,4—1,6	1,0

Сотопласти — это пространственная конструкция из полимерных материалов с регулярно повторяющимися ячеями правильной геометрической формы. Сотопласти изготавливаются различными методами (блочным, растяжением, объемного тяжения) и характеризуются видом и толщиной материала, из которого они выполняются (хлопчатобумажная ткань, стеклоткань и т. д.), а также формой, усиливанием и размерами ячеек. По форме ячеек в плане сотопласти могут быть квадратными, ромбовидными, шестиугольными и спиральными. Для повышения прочности и жесткости стены ячеек сотопластов могут усиливаться. Увеличение жесткости достигается гофрированием стенок сот, постановкой дополнительных лент в плоскостях склейки (рис. 26).

Прочностные характеристики сотопластов в основном зависят от свойств материалов, из которых они изготавливаются, и геометрических параметров сот.

Сборка трехслойных конструкций с несущими слоями из пластмасс производится в основном при помощи пленок синтетических смол. Однако прочность кляевого соединения со временем снижается (рис. 27).

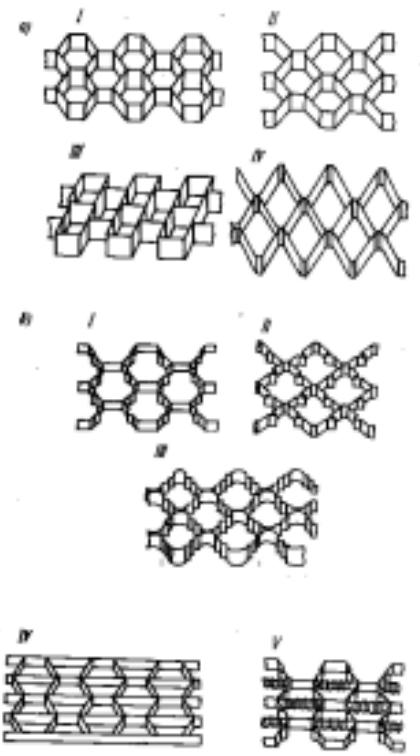


Рис. 26. Виды сотового заполнителя:  
I — нормальный сотограт; II — ромбический; III — квадратный; IV — скользящий; V — уступчатый сотограт;  
VI — гармошечный листограт; VII — гармошечный квадратный; VIII — гармошечный квадратный с продольной линией; IX — гармошечный листограт с поперечной линией.

Указанный недостаток может быть значительно уменьшен применением химической сварки сот с несущими слоями. Однако она несет количественных характеристиках сварных стыков несущих слоев с сотовым заполнителем.

Вследствие этого в качестве несущих слоев конструкций, подвергающихся длительному воздействию высоких температур или постоянных нагрузок, пластмассы неприменимы. В таких конструкциях используются металлические несущие слои. Сборка металлических несущих слоев с металлическими сотами производится при помощи различных клеев, а также пайки или сварки. Последние типы соединений обладают высокой прочностью. Однако при пайке и сварке возникает необходимость нагрева несущих слоев, что существенно сказывается на свойствах термообработанных материалов.

При сборке металлических несущих слоев с заполнителем используются различные пленки синтетических смол и жидкие клеи. Для улучшения качества склейки, как правило, между несущими слоями вводятся подслой из пропитанной смолами стеклоткани. Соединение стеклосотоцелла с подслоем может производиться путем линнической сварки.

Несколько более подробно рассмотрим заполнитель сотового типа.

В зависимости от назначения сотовый заполнитель может изготавливаться из неметаллических материалов (стеклоткань, хлопчатобумажная ткань, специальные сорта бумаги и т. п.) и из металлов (алюминиевые сплавы, сталь, титан).

В конструкциях, подвергаемых действию нагрузок некоторой интенсивности и работающих в режимах температур, близких к нормальным, наиболее широкое применение нашли

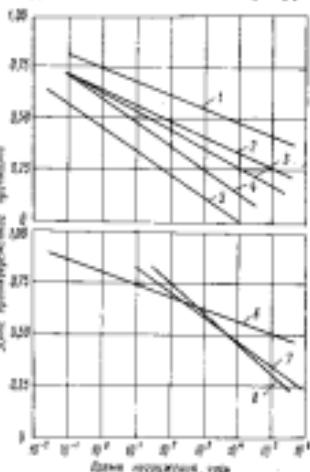


Рис. 27. Зависимость прочности химического соединения от времени.

1 — алюминий — пластиковая смесь ЭПИ-Б; 2 — алюминий — ДСП (пластик ВС-1, наполнитель 15 вес.-%); 3 — алюминий — ДСП (пластик ВС-1, наполнитель 1 вес.-%); 4 — алюминий — пластиковая смесь ЭПИ-Б; 5 — алюминий — пенопласт (пластик ЭПИ-Б); 6 — алюминий — пенопласт (пластик ЭПИ-Б); 7 — алюминий — алюминий (пластик ЭПИ-II).

заполнители из хлопчатобумажной ткани, крафт-бумаги. Такие заполнители весьма дешевы и обладают в нормальных условиях очень высокой удельной жесткостью и прочностью. Однако абсолютные прочностные характеристики таких заполнителей низкие, поэтому в ответственных узлах, подверженных действию нагрузок с высокой интенсивностью, используются заполнители из стеклотканей, алюминиевых сплавов, стали и титана.

Стеклосотористы выпускаются с ячейками, имеющими радиусы описанной окружности 5, 7, 14 мм.

Для изготовления сотовых заполнителей с низкой теплопроводностью может быть использована ткань, полученная на основе полых стекловолокон. Однако удельная жесткость такой ткани равна удельной жесткости ячеек из сплошного стекловолокна, а коэффициент теплопроводности в два раза меньше, чем у ячеек из сплошного волокна [36].

Для изготовления неметаллических сотовых заполнителей используются также бумага ИП-63, пропитанная карбамидными смолами МФФ и МФ-17, крафт-бумага КР, пропитанная битумным лаком, карбамидной смолой или эпоксидной смолой ЭЛ-5.

По методу изготовления сотовые заполнители делаются из сварных (спаянных), клееных и изготавливаемых методом объемного тяжения.

Металлические сотовые заполнители собираются из листов (лент) металлической фольги с помощью склеивания или сварки (стыков). Неметаллические сотовые заполнители изготавливаются в основном склеиванием из листов ткани или бумаги.

Объемная структура сотовых заполнителей образуется при растягивании пакетов склеенных определенным образом листов заготовок или путем предварительного гофрирования листов заготовок и последующего склеивания их в пакеты. Метод растягивания более перспективен, так как позволяет шире механизировать процесс производства сотовых заполнителей и уменьшить стоимость их изготовления. Этот метод применяется для изготовления сотового заполнителя из металла и стеклопластика с заполнителем из плотных стеклотканей.

Метод склеивания предварительно гофрированных листов значительно менее производителен и используется лишь для получения небольших партий заполнителя, изготовленного из стеклопластика большой толщины и имеющего сотовы малого размера.

В настоящее время начинают применяться для новых метода изготовления сотовых заполнителей из неметаллических материалов. Одни из них — метод объемного тяжения. Изготовление сотового заполнителя из тканых материалов имеет следующие преимущества перед другими методами:

- более высокую прочность в местах соединения сотов вследствие применения механической связи;
- возможность введения в конструкцию нитей различных материалов (металлических, асbestosовых) для придания заполнителю определенных свойств;
- возможность изготовления сотовых заполнителей переменной толщины с увеличением отдельных наиболее нагруженных участков;
- изодиаграмма волокон при изготовлении конструкции любой формы;

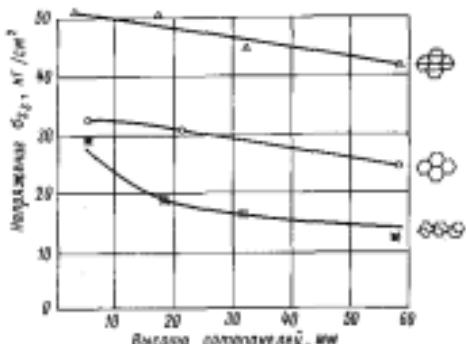


Рис. 28. Зависимость предела прочности сотового заполнителя при склеивании от высоты сотов и формы ячеек.

— полная механизация всех операций процесса изготовления, вследствие чего повышается качество продукции и снижается производительность труда;

— возможность изготовления заполнителя одновременно с одним из несущих слоев или подслоем, прикрепляемым затяжкой к несущему слою из другого материала.

Последнее обстоятельство может существенно увеличить прочность конструкции с сотовым заполнителем, если несущий слой обращен к источникам высоких температур, так как все клевые соединения снижают свои прочностные характеристики при нагреве.

Другим перспективным методом изготовления сотового заполнителя из пропитанных сложных материалов является гибридная сварка сотов, разработанная в МАТИ.

Этот метод позволяет повысить качество соединения сотов и одновременно снизить объемную массу заполнителя, поскольку становится возможным обходиться без клея как связующего элемента между лентами сотов. Кроме того, он позволяет механизировать процесс и производить сборку сотов с двухя или трехклопными кессуальными стойками или подставками.

Наиболее просты в изготовлении шестиугольные соты и близкие к ним по форме синусоидальные. В шестиугольных сотах материал расположен наиболее экономично и поэтому обладает более высокой удельной прочностью по сравнению с другими формами ячеек.

На графике рис. 28 показана зависимость предела прочности сотов при сжатии от размеров и формы ячейки [56].

—

## Глава IV.

### СОЕДИНЕНИЕ ПЛАСТИМАСС МЕЖДУ СОБОЙ И С ДРУГИМИ МАТЕРИАЛАМИ

#### § 9. Составление вопроса

Применение пластмассовых материалов и их композитов требует решения целого комплекса вопросов, среди которых важное место занимают вопросы их соединения. Свойства этих материалов в тем более их различие, как правило, обуславливают значительные затруднения при решении проблемы их механически прочного соединения, так как возможность применения обычных способов — сварки, клепки, пайки, из болтах — или затруднительна и снижает эффективность и качество конструкции или исключена. В связи с этим приобретает большое значение изучение вопросов, связанных со склейванием как одним из способов соединения, разрешающих в известной мере эту проблему.

В настоящее время как у нас, так и за рубежом ведутся широкие исследования соединений с помощью клея самых разнообразных однородных и разнородных материалов — древесины, металлов, пластмасс, бетона и др. К числу положительных качеств этого способа соединения следуют отнести:

а) возможность соединения разнообразных однородных и разнородных материалов без опасности появления электролитической коррозии;

б) равномерность распределения напряжений в соединении, что повышает его сопротивление изабрационным нагрузкам;

в) возможность получения гладкой внешней поверхности наружных и герметичных соединений, что весьма затруднительно осуществить, применяя заклепки или болты;

г) отсутствие необходимости сверления отверстий и установки крепежа, что при электропечных и болтовых соединениях усложняет технологический процесс и снижает прочность соединения.

Однако объем использования клея в различных отраслях промышленности, в том числе и судостроения, еще недостаточен.

Это в значительной мере объясняется многообразием факторов, влияющих на качество соединений, что требует широких разносторонних исследований. Серьезный тормоз также является недостаточной изученностью вопросов проектирования и расчета kleевых соединений, что вызывает необходимость проведения в каждом случае большого количества испытаний.

Обобщая существующие сведения, все факторы, влияющие на прочность kleевых соединений, можно разбить на пять крупных групп:

- 1) зависящие от клея;
- 2) зависящие от соединяемых материалов;
- 3) конструктивные;
- 4) технологические;
- 5) эксплуатационные.

Первую группу факторов включают физико-механические свойства клея, его когезионную и адгезионную прочность, смачивающую способность, способность склеиваться и отвердевать. Факторы этой группы оцениваются путем испытаний стандартных образцов из самого клея и соединений.

К факторам второй группы относятся: физико-механические и физико-химические свойства соединяемых материалов (существо и прочностные характеристики, молекулярное строение, плотность и т. п.), характер (пористая, гладкая) и смачиваемость склеиваемых поверхностей и т. п.

В третью группу факторов входят геометрические размеры элементов соединения.

К четвертой группе факторов относятся: взаимодействие поверхностей к склеиванию, температура и влажность воздуха в рабочей помещении, величина давления и продолжительность действия его при склеивании деталей, температура изгиба при склеивании.

Пятую группу факторов составляют условия эксплуатации: вид нагрузки (скатие, изгиб, растяжение, отрыв и т. п.), характер нагружения (статическое, динамическое), продолжительность нагружения (временное, длительное) и, наконец, действие среды в период эксплуатации (температуры, влаги и т. п.).

Специфика и азиновская большинства из перечисленных факторов требуют комплексного изучения вопросов склейивания специалистами различных профилей.

Прочность kleевого соединения в значительной мере зависит от степени сцепления клея и склеиваемой поверхности (адгезии) и от сил склеивания внутри kleевой прослойки (когезии). Вопрос о природе адгезии до сих пор является предметом широких исследований и дискуссий [22], [26]. Существует несколько теорий адгезии: адсорбционная, электрическая, диффузионная и др. Дополняя одна другую, они свидетельствуют о том, что адгезию нельзя рассматривать как механическое

сцепление клея и склеиваемых поверхностей с образованием соединений, подобных заклепочным. Адгезия есть специфическое явление, которое зависит от состава и строения молекул, составляющих клеющие вещества и склеиваемые материалы.

Вопросы влияния смачиваемой поверхности жидким клеем на адгезию рассматривались в работах [37], [114], [133] и др. Установлено, что прочность соединения зависит от глубины проникновения.

Из работ [11], [18], [58], [105], посвященных исследованиями влияния различных технологических факторов на прочность соединений, видно, что получение качественных соединений с применением клея возможно лишь при полном соблюдении технологических режимов и условий склейивания, специфических для той или иной марки клея и склеиваемых материалов.

Исследование прочности различных типов kleевых соединений и kleевых конструкций до последнего времени шло главным образом экспериментальным путем (исключение составляют лишь соединения деревянных конструкций). Но результаты экспериментов давали надежные данные по прочности соединения только конкретных материалов и конструкций с определенными размерами и нагрузкой. Такой подход к исследованию kleевых соединений требует большого количества испытаний образцов, создания условий, близких к реальным, или же проведения альтернативных испытаний. Поэтому совершилось очевидное необходимость создания теории расчета прочности kleевых соединений. Сейчас в СССР и за рубежом уже опубликованы работы, внесшие известную ясность в эти вопросы.

Исследование характера распределения напряжений в kleевых соединениях и расчета их прочности относится главным образом к соединениям, выполненным наилучшую при статическом растяжении.

Установлено, что для kleевых соединений наилучшую напряженность сдвиг при растяжении распределяны неравномерно и величина разрушающей нагрузки при достижении наилучшее определенной величины остается постоянной, причем напряжения концентрируются по концам и величина их может превосходить среднюю величину  $t - P/l$  в несколько раз. Именно эти максимальные напряжения определяют исходную способность соединения.

К числу первых исследований, решавших задачу о концентрации напряжений в kleевых соединениях, следует отнести работы Фолькерсена. Впоследствии в этом направлении работали Лебрейн, Миллер, Пирри и др.

Теория Фолькерсена явилась, по существу, основой для развития всех дальнейших проработок. Заметим, что в полуутягом уравнении не учитывается разделяющие напряжения, возникающие по концам нахлестки от экскентричности приложения

нагрузки. Между тем при определенных параметрах элементов эти напряжения могут значительно сниять прочность соединения.

Голанд и Рейсснер [58] рассматривают работу нахлесточных соединений с учетом деформации жгута от эксцентричности приложения сил. Полученные ими окончательные выражения сложны и громоздки, но однако позволяют производить строгий математический анализ распределения напряжений в таких соединениях, а графическое представление этих уравнений весьма удобно для практического использования.

В ряде работ [116], [119], [125] показана эффективность сварки соединяемых листов «на ус» для повышения прочности kleевых соединений. Однако изменение толщины листов настолько трудоемкий процесс, что такой способ упрочнения kleевых соединений в большинстве случаев применить невозможно.

Вопросы распределения напряжений в kleевом слое соединений в стык при растяжении или сжатии рассматриваются в работах [135], [137]. Установлено, что вблизи кромок возникает концентрация напряжений. Это объясняется различной склонностью к поперечной деформации склеиваемых материалов и клея.

Заслуживают внимания работы [38], [115], [117], посвященные вопросу влияния толщины kleевого слоя на несущую способность соединения. В них в известной мере объясняется кажущееся противоречие между экспериментом и теорией.

Влияние толщины kleевой прослойки оказывается на прочности kleевых соединений двояко. С одной стороны, уменьшение толщины увеличивает адгезию, уменьшает влияние предных усадочных (интэрниых) напряжений и снижает статистическую вероятность внутренних дефектов. С другой стороны, увеличение толщины kleевой прослойки увеличивает пластичность соединения, а отсюда и нагрузку на сам клей и сцепление его с поверхностью материала.

Большая работа в области исследования напряжений в kleевых соединениях проделана советскими специалистами. Это касается прежде всего исследований соединений деревянных конструкций. К числу наиболее важных работ в этом направлении следует отнести работы А. Б. Губенко [31], [32], [33], В. Н. Быковского [18], [19], Ю. М. Ильинова [39], В. М. Коченова [64], [65], [66], В. М. Хрулева [105], [106], [107], В. Г. Михайлова [71].

Kleевые соединения металлов рассматривали С. А. Носов [75], И. И. Митайлов [72], Г. И. Панчин и др.

В работе [92] рассматриваются несколько типов соединений и схем приложения нагрузок применительно к реальной конструкции самолета. Применительно к судостроению следует упомянуть работы А. И. Павлова [76].

Как видно из приведенного краткого обзора, kleевые соединения являются предметом широкого исследования как у нас, так и за рубежом. Результаты этих исследований позволяют судить о специфике работы kleевых соединений и для отдельных типов соединений, выполняемых из определенных материалов, производить приближенные расчеты прочности при соответствующем нагружении.

Специфика судовых конструкций, в том числе и рассматриваемых, условия их эксплуатации и, главное, особые свойства пластика, делают необходимым специальное освещение ряда вопросов расчета прочности kleевых соединений, часть которых нашла отражение в рамках опубликованных работ авторов [40], [44], [45], [46], [47], [48].

## § 10. Влияние анизотропии склеиваемых материалов на несущую способность их соединений

Большинство судовых конструкций изготавливается из стеклопластика на основе стеклотканей. При однородной укладке слоев стеклотканей стеклопластик можно рассматривать как ортотропный материал, имеющий две взаимно перпендикулярные плоскости упругой симметрии. Соединение листов из стеклопластика осуществляется главным образом на kleях с помощью двухсторонних пакетов из того же материала. В качестве kleя обычно применяется полиэфирная смола, служащая связующим для стеклопластика.

Рассмотрим работу соединения, растягиваемого силой  $P$  (рис. 29).

Предполагаем, что:

- упругие и прочностные свойства элементов соединения в одинаковых направлениях равны;
- соединение рассчитывается как монолитное. В данном случае можно допустить, что если kleевая прослойка и не будет учтена, это не скажется на общности решения;

- система имеет две плоскости упругой симметрии — в направлении действующих усилий и в направлении, перпенди-

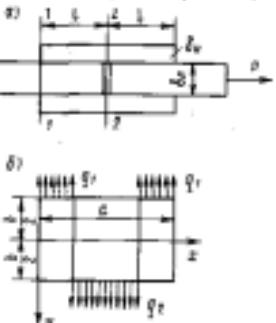


Рис. 29. Схемы соединения с пакетами при растяжении: а — схема соединения и приложения нагрузки; б — расчетная схема.

кулярном площади склейки. Рассматривая соединение единичной шириной, считаем возможным, упрощая решение, не учитывать отличие свойств материала в плоскости листа:

— нормальные напряжения по торцам элементов распределены равномерно. Это допущение является общепринятым при решении аналогичных задач и в достаточной мере отражает действительную картину явления.

Часть соединения между сечениями 1—1 и 2—2 (рис. 29, а) можно представить как ортотропную пластину ограниченного контура, загруженную по краям нагрузками  $\varphi_1 = q_1$  (рис. 29, б), где  $b_0$  — толщина накладки;  $b_0$  — толщина соединяемых листов;  $b = l$  — длина полуклапки;  $a = b_0 + 2b_0$ .

$$\text{Примем } b_0 = \frac{1}{2}b, \text{ тогда } \varphi_1 = \varphi_2 = -\frac{1}{2}\frac{p}{b_0}.$$

Составляющие напряжений будут

$$\sigma_x = \frac{\partial F}{\partial y}; \quad \sigma_y = \frac{\partial F}{\partial x}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial F}{\partial xy}. \quad (16)$$

Для ортотропной пластины дифференциальное уравнение, которому удовлетворяет функция напряжений, записывается

$$\frac{1}{E_1} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \left( \frac{1}{G} - \frac{2b_0}{E_1} \right) \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} + \frac{1}{E_1} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0. \quad (17)$$

Функция напряжений принимается в форме Файлона:

$$F = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(y) \sin \frac{n\pi x}{a}. \quad (18)$$

Выражение для функции  $f_n(y)$  применительно к стеклопластикам было получено в работе [46]:

$$f_n(y) = A_n \sinh k_1 \frac{n\pi y}{a} + B_n \sinh k_2 \frac{n\pi y}{a} + C_n \cosh k_2 \frac{n\pi y}{a} + D_n \sinh k_2 \frac{n\pi y}{a},$$

где

$$\begin{aligned} k_1 &= \sqrt{B + \sqrt{B^2 - C}}; \\ k_2 &= \sqrt{B - \sqrt{B^2 - C}}; \\ 2B &= \frac{E_1}{G} - 2b_0; \\ C &= \frac{E_1}{E_2}. \end{aligned} \quad (19)$$

Нагрузка  $q$  расчленяется на составляющие и представляется в виде, показанном на рис. 30, а, б. Тогда задача сводится

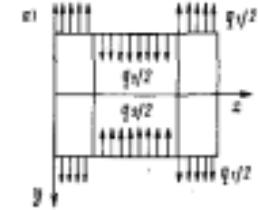
к известным решениям [77] пластин, загруженных по продольным кромкам нормальными напряжениями:

1) случай — симметрический по отношению к оси  $x$ ;

II) случай — асимметрический по отношению к оси  $x$ .

Компоненты напряжений с граничными условиями Файлона приложении этих решений определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sum_{n=1}^{\infty} b_0 \delta_n \sin(n\pi x); \\ \sigma_y &= \sum_{n=1}^{\infty} b_0 \psi(n\pi x) \sin(n\pi x); \\ \tau_{xy} &= \sum_{n=1}^{\infty} b_0 x \psi(n\pi x) \cos(n\pi x). \end{aligned} \quad (20)$$



где  $\delta_n$  — величины, зависящие от свойств материала коэффициенты ряда

$$\varphi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \delta_n \sin(n\pi x). \quad (21)$$

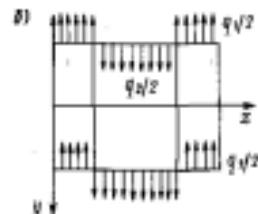


Рис. 30. Схема расчленения нагрузки по отношению к оси  $x$ : а — симметрический; б — асимметрический.

Выражения для определения функций напряжений (16) имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{k_1 k_2 [l^{n^2} (k_1 - 1) - l^{m^2} (k_2 - 1)]}{(k_1 - k_2) l^{n^2}}; \\ q &= \frac{k_1 l^{n^2} - k_2 l^{m^2}}{(k_1 - k_2) l^{n^2}}; \\ x &= \frac{k_1 k_2 (k_1 - 1) [l^{n^2} - l^{m^2}]}{(k_1 - k_2) l^{n^2}}, \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$k_1 \frac{\delta}{2} + k_2 y = i; \quad k_2 \frac{\delta}{2} + k_1 y = s; \quad \frac{\delta}{2} (k_1 + k_2) = \eta.$$

Используя выражения (20) и (22), можно определить величину напряжений в различных сечениях соединения при различной степени анизотропии.

Как видно из полученных выражений, для определения функций  $\Phi$ ,  $\phi$  и необходимо знать значения корней характеристического уравнения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , которые в свою очередь зависят от параметров  $E$ ,  $E_1$ ,  $G$  и  $\tau$ . Табулирование значений этих функций при разной степени анизотропии требует весьма громоздких вычислений. Поэтому, принимая во внимание поставленную задачу, рассмотрим относительное изменение напряжений в соединениях заданных размеров из стеклопластика, имеющих определенные свойства.

На рис. 31 приведены графики изменения функций  $\Phi$ ,  $\phi$  и  $\chi$  в зависимости от степени анизотропии материала, т. е. отношения  $\frac{E_1}{E}$ , для

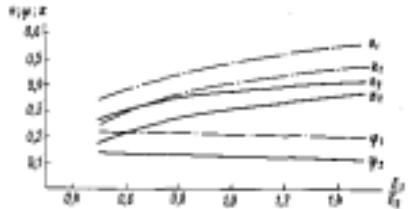


Рис. 31. Изменение  $\Phi$ ,  $\phi$  и  $\chi$  в зависимости от степени анизотропии материала.

$$\frac{E_1}{G} = 10; \quad \frac{E_1}{E} = 5$$

соединений при  $\alpha_0 = 1$ ;  $\frac{B}{2} = 1$  и  $\frac{2y}{B} = 0.5$ . Графики построены для двух частных случаев  $\frac{E_1}{G} = 5$  и  $\frac{E_1}{G} = 10$ , что находится в пределах реальных соотношений упругих характеристик стеклопластиков.

Из этих графиков видно, что с увеличением жесткости в направлении действия заданных растягивающих усилий  $\sigma_x$  и  $\tau_{xy}$  уменьшаются, значение  $\sigma_y$  остается практически постоянным. Уменьшение модуля сдвига материала во всех случаях снижает величину напряжений в соединении.

Отсюда следует, что при принятой расчетной схеме соединения стеклопластиков, имеющих относительно низкие значения модулей сдвига при  $\frac{E_1}{E} < 1.0$ , может быть использовано решение П. Ф. Папковича, полученное для изотропного материала, где  $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2 \rightarrow 1$ , что дает ошибку в безопасную сторону. Таким образом, при определении напряженного состояния соединений

стеклопластиков можно не учитывать анизотропию упругих свойств склеиваемых элементов и рассматривать их как изотропные.

#### § 11. О внутренних напряжениях в соединениях стеклопластиков

Известно, что стеклопластик в процессе отверждения испытывает значительные усадочные деформации, достигающие  $\sim 1.5\%$ . Если бы в процессе усадки не происходила релаксация напряжений, то при наличии факторов, стесняющих деформацию материала (например, жесткое закрепление концов стержня), после окончания процесса отверждения остаточные напряжения могли бы достигать  $\sim 2000 \text{ кН/см}^2$  (при модуле корытообразной упругости  $E = 1.5 \cdot 10^5 \text{ кН/см}^2$ ).

В известной нам литературе, посвященной расчету конструкций из стеклопластика, о таких остаточных технологических напряжениях не упоминается. Иначе говоря, молчаливо признается одно из следующих допущений:

- все элементы конструкций в процессе отверждения могут свободно деформироваться;
- к концу технологического процесса усадочные напряжения полностью релаксируют.

Первое из них в условиях изготовления судовых корпусных конструкций почти никогда не выполняется, так как в процессе сборки корпуса мы неизбежно имеем дело со сваркоформованными деталями, соединенными с уже отвержденными конструкциями. Что касается второго допущения, то нет данных, подтверждающих его. Более того, имеются косвенные сдвигательства возможности существования усадочных напряжений. Так, например, известно, что прочность соединений стеклопластика меньше, чем у основного материала, лесоматра на обеспечение химической однородности ячеистого слоя и соединемых элементов и отсутствие концентраторов напряжения.

Нами предпринята попытка теоретического исследования закономерности изменения напряжений в стеклопластике в процессе отверждения.

Поскольку в нашей вам литературе полностью отсутствуют сведения об изменении механических свойств стеклопластика в процессе отверждения, настоящие исследование должно рассматриваться как предварительная проработка постановки задачи. Эта проработка имеет целью выяснить, от каких факторов зависит усадочные напряжения и какими данными нужно располагать для полного решения вопроса. На этой стадии ограничимся рассмотрением линейного напряженного состояния, например, модели стержня, закрепленного по концам таким образом, чтобы предотвратить их сближение, и не подверженного в процессе усадки действию линий актиных внешних нагрузок.

Предполагаем, следовательно, что все характеристики процесса в любой точке любого сечения одинаковы. Поскольку конкавы стержня (и любые его сечения) не могут смещаться, усадочные деформации в полностью компенсируются суммой упругих  $\varepsilon_{\text{упр}}$  и неупругих  $\varepsilon_{\text{непр}}$  деформаций материала:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{непр}}. \quad (23)$$

В отношении усадочных деформаций примем допущение, что темп усадки зависит только от времени и не зависит от напряжений

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}(t), \quad (24)$$

где  $t$  — время, сек.

Основанием для этого служит тот факт, что усадка есть результат чисто химического процесса. Упругие деформации в каждый момент времени зависят только от напряжений, т. е. предистория процесса для них не играет роли, поскольку упругие деформации во времени не отстают от напряжений. Зависимость упругих деформаций от времени в общем случае произвольная, но обязательно линейная, причем параметры, характеризующие ее, могут изменяться:

$$\varepsilon_{\text{упр}} = \varepsilon_{\text{упр}}(\sigma, t) \quad \text{или} \quad \varepsilon_{\text{упр}} = \frac{\sigma(t)}{E(\sigma, t)}, \quad (25)$$

где  $E$  — модуль упругости (мгновенный).

Наконец, относительно неупругой составляющей деформации будем предполагать, что она имеет природу ползучести, т. е. в любой момент времени характеризуется определенной кинетической скоростью деформации ( $\dot{\varepsilon}_{\text{непр}}$ ), зависящей от напряжений. Кроме того, по смыслу задачи, связь между напряжениями и скоростью деформации должна существенно изменяться во времени.

Начнем, окончательно.

$$\dot{\varepsilon}_{\text{непр}} = \dot{\varepsilon}_{\text{непр}}(\sigma, t).$$

Отсюда сила деформации

$$\ddot{\varepsilon} = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{\text{непр}}(\sigma, t) dt. \quad (26)$$

Предполагается, естественно, что в начале процесса деформации отсутствуют.

Теперь условие (23) с учетом (24), (25) и (26) примет вид:

$$\ddot{\varepsilon} = \frac{\sigma(t)}{E(\sigma, t)} + \int_0^t \dot{\varepsilon}_{\text{непр}}(\sigma, t) dt. \quad (27)$$

Дифференцируя последнее уравнение по времени, получим дифференциальное уравнение для определения неизвестной функции  $\sigma(t)$ :

$$\ddot{\sigma}(t) = \left[ \frac{\dot{\sigma}(t)}{E(\sigma, t)} \right]' + \dot{\varepsilon}_{\text{непр}}(\sigma, t). \quad (28)$$

Для дальнейшего решения необходимо задаться конкретными значениями функций  $\dot{\varepsilon}(t)$ ,  $E(\sigma, t)$  и  $\dot{\varepsilon}_{\text{непр}}(\sigma, t)$ . Как уже отмечалось, в литературе отсутствуют экспериментальные данные, на которых можно было бы основываться при выборе аналитического вида этих функций. Поэтому аналитическое выражение для них могут быть выбраны в данном этапе исследования произвольно, но таким образом, чтобы, во-первых, не нарушался физический смысл входящих в уравнение величин, и, во-вторых, чтобы можно было параллельно изучать темп изменения параметров.

Ограничим, прежде всего, выбор функций следующими допущениями. Известно, что модуль упругости стекловолокна определяется практически модулем упругости стекловолокна, который в процессе усадки не изменяется и в интересующем нас диапазоне не зависит от напряжений. В дальнейшем, следовательно, подлагаем

$$E = E(t) = \text{const} = E, \quad (29)$$

Упругость сцепления пластичной массы со стекловолокном здесь пренебрегаем.

Далее для большинства экспериментально исследованных законов ползучести скорость деформации ползучести пропорциональна степенным функциям напряжений с различными показателями степени. Предполагаем таким образом, что

$$\dot{\varepsilon}_{\text{непр}}(\sigma, t) = f(t) \sigma^n, \quad (30)$$

где функция  $f(t)$  остается пока не определенной. С учетом сделанных допущений дифференциальное уравнение примет вид

$$\frac{d\sigma}{dt} + Ff(t) \sigma^n = E\dot{\varepsilon}(t). \quad (31)$$

Это уравнение не интегрируется при произвольном показателе  $n$ , а только при  $n=1$ . Для большинства реальных материалов величина  $n$  не бывает равна единице, а всегда больше единицы. Однако нарушения физической картины и при  $n=1$  не происходит. Поэтому, учитывая качественный характер исследования, примем пока  $n=1$ , тогда

$$\frac{d\sigma}{dt} + Ff(t)\sigma = E\dot{\varepsilon}(t). \quad (32)$$

Полученное линейное уравнение интегрируется общими методами и решение его приводят к выражению

$$z = Ee^{-\frac{E}{b} \int^t_0 \frac{\dot{f}}{E} dt} - \frac{E}{b} \int^t_0 e^{-\frac{E}{b} \dot{f} dt}. \quad (33)$$

Полученная в интегральном виде зависимость  $z(t)$  далеко не при любых  $\omega(t)$  и  $f(t)$  выражается через элементарные функции. Поэтому подбора был найден один из вариантов записи функций  $\omega$  и  $f$ , удовлетворяющей физическому смыслу задачи:

для усадочных деформаций

$$\omega(t) = \omega_0(1 - e^{-at}); \quad (34)$$

для скорости ползучести

$$f(t) = ae^{-bt}. \quad (35)$$

Вид графиков этих функций показан на рис. 32.

Из формул (34), (35) яко графике ясен физический смысл коэффициентов  $a$  и  $b$ :  $a$  является коэффициентом пропорциональности между напряжением и скоростью деформации усадки, а  $b$  — коэффициентом пропорциональности между напряжением и скоростью ползучести.

Из (34) и (35) следует

$$\omega = \omega_0 e^{-at}; \quad (36)$$

$$\int f dt = -\frac{a}{b} e^{-bt}. \quad (37)$$

Тогда выражение (33) записывается в виде

$$z(t) = Ee^{-\frac{E}{b} \int^t_0 \omega_0 e^{-as} e^{-\frac{E}{b} \int^s_0 e^{-bt} ds} dt}. \quad (38)$$

Рассмотрим два случая соотношения темпов и усадок и ползучести.

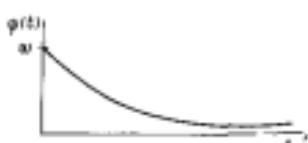


Рис. 32. Изменение  $\omega$  и  $\phi$  в зависимости от  $t$ .

Константы  $a$  и  $b$  характеризуют соответственно темп усадки и темп ползучести.

Когда темп усадки совпадает с темпом ползучести ( $a=b$ ), напряжения усадки будут

$$\tau_u = \lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = \frac{\omega_0}{a} \left( 1 - \frac{1}{e^{ab}} \right). \quad (39)$$

Когда темп усадки выше темпа ползучести ( $a>b$ ), напряжения усадки будут

$$\tau_u = \frac{\omega_0}{a} \left[ \frac{b}{Ea} \left( 1 - \frac{1}{e^{ab}} \right) - \frac{1}{e^{ab}} \right]. \quad (40)$$

Из этих формул видно, что остаточные усадочные напряжения в основном определяются соотношением между параметрами  $a$  и  $b$ , характеризующими темп ползучести и усадки. В зависимости от соотношения этих параметров усадочные напряжения могут изменяться в широких пределах.

## § 12. Прочность стыковых kleевых соединений при растяжении—сжатии

Характер распределения к величине напряжения в kleевом шве зависит от геометрических и жесткостных параметров элементов соединения, определяющих его расчетную схему. При этом могут существовать две расчетные схемы:

- без учета kleевой прослойки;
- с учетом kleевой прослойки.

Условия, характеризующие ту или иную расчетную схему, могут быть определены [48] исходя из рассмотрения работы соединения, представленного на рис. 33.

Потенциальная энергия деформации такой системы записывается в виде

$$V = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left( \frac{1-\mu^2}{E} (z_x^2 + z_y^2 - \frac{2\mu}{1-\mu} z_x z_y) dx dy + \right. \\ \left. + \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{1-\mu^2}{2G_K} (z_{xx}^2 + z_{yy}^2 - \frac{2\mu}{1-\mu} z_{xy} z_{yx}) dx dy + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-b/2}^{b/2} z_{xy}^2 dx dy + \frac{1}{2G_K} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-b/2}^{b/2} z_{yx}^2 dx dy \right), \quad (41)$$

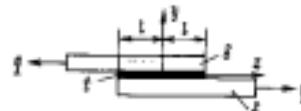


Рис. 33. Схема приложения усилий в соединении.

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  — нормальные и касательные напряжения в соединяемых элементах;

$\sigma_{0x}$ ,  $\sigma_{0y}$ ,  $\tau_{0xy}$  — нормальные и касательные напряжения в клеевом шве;

$E$ ,  $G$ ,  $\mu$  — модули нормальной упругости и сдвига и коэффициент Пуассона соединяемых материалов;

$E_0$ ,  $G_0$ ,  $\mu_0$  — модули нормальной упругости и сдвига и коэффициент Пуассона для клея.

Так как  $\delta_0 \ll \delta_0$ , можно сделать допущение, что  $\delta_0=0$ , а отсюда без больших погрешностей можно предположить, что  $\delta_{0x}$  и  $\delta_{0y}$ , не равные нулю, будут распределены по толщине клеевого шва равномерно.

Тогда энергия деформаций может быть приближенно записана:

а) для склеиваемых элементов от нормальных напряжений

$$V_1 = \frac{3\pi}{32} \int_{-l}^{+l} \tau_{xy}^2 dx; \quad (42)$$

от касательных напряжений

$$V_1 = \frac{3\pi}{32} \int_{-l}^{+l} \tau_{xy}^2 dx; \quad (42)$$

б) для клеевого слоя от нормальных напряжений

$$V_2 = \frac{1}{2} \frac{\delta_0}{E_0} \int_{-l}^{+l} \tau_{xy}^2 dx; \quad (43)$$

от касательных напряжений

$$V_2 = \frac{1}{2} \frac{\delta_0}{G_0} \int_{-l}^{+l} \tau_{xy}^2 dx. \quad (43)$$

Согласно принципу наименьшей работы действительное распределение напряжений будет таким, при котором удовлетворяются граничные условия и потенциальная энергия достигает своего наименьшего значения. В этом случае можно дать два приближенных решения: не учитывать работу деформации клеевой прослойки или склеиваемых листов.

Условие, определяющее возможность применения первого приближенного решения, получим из (42) и (43):

$$\frac{\delta_0}{E_0} < \frac{\delta_0}{E} \text{ и } \frac{\delta_0}{G_0} < \frac{\delta_0}{G}. \quad (44)$$

Для второго решения это условие примет вид

$$\frac{\delta_0}{E} < \frac{\delta_0}{E_0} \text{ и } \frac{\delta_0}{G} < \frac{\delta_0}{G_0}, \quad (45)$$

где  $k>1$  и  $n>1$  — некоторые коэффициенты, определяемые путем сравнения экспериментальных и теоретических данных ( $k=n=10$ ).

Из (44) и (45) видно, что выбор той или иной расчетной схемы зависит от относительных толщин и упругих характеристик элементов соединения. При относительно тонких и жестких склеиваемых прослойках соединение можно рассматривать как монолит. К таким соединениям, очевидно, могут быть отнесены соединения многих видов пластмасс, близких по своей природе к клею.

Задача о напряженном состоянии соединений с двумя накладками без учета упругих характеристик клеевого слоя

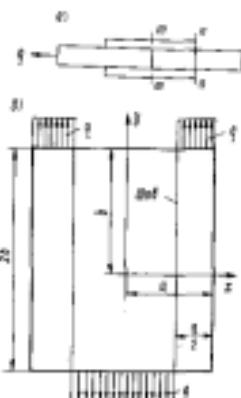


Рис. 34. Стresses в соединении с накладками при растяжении (a) и его отсеченная часть (b).

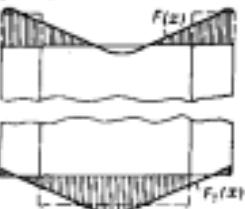


Рис. 35. Характер распределения  $F(x)$  и  $F_1(x)$ .

была рассмотрена в работах [19], [32] и др. применительно к древесине. Она сводилась к определению сдвигавших усилий в элементах с податливой упругой связью, за которую принимался слой древесины между осью каждого элемента и швом.

Рассмотрим соединение, представленное на рис. 34, а. При этом будем считать, что податливые связи отсутствуют, соединенные листы и накладки единичной ширине выполнены из одного и того же материала, толщина каждой накладки равна половине толщины склеиваемых листов.

Представим отсеченную часть соединения (рис. 34, б) как пластину с ограниченным контуром ( $x=\pm a$ ;  $y=\pm b$ ), загруженную на определенных участках равномерно распределенной нагрузкой.

Симметричную прерывистую нагрузку  $q$  верхнего и нижнего краев заменим непрерывной, разложив ее в ряд Фурье:

для верхнего

$$F(x) = \frac{a}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \frac{k\pi x}{a}, \quad (46)$$

для нижнего

$$F_1(x) = \frac{b}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos \frac{k\pi x}{a}.$$

Коэффициенты  $a_k$  и  $b_k$  определяются по известным формулам.

Для определения напряженного состояния пластины, загруженной подвум кромкам (рис. 35) нагрузкой  $F(x)$  и  $F_1(x)$ , может быть использовано каноническое уравнение Кастильяно-Ритца для плоско-напряженного состояния [77]. Ниже графически представлены результаты решения этой задачи.

Из рис. 36 видно, что нормальные напряжения  $\sigma_x$  в районе клеевого шва по длине накладки распреде-

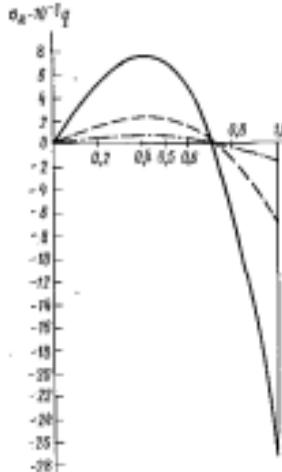


Рис. 36. Распределение нормальных напряжений по длине клеевого шва.

$$-\frac{b}{2} \leq x \leq 0 \quad \sigma_x = \frac{b}{2} + \frac{b}{a} \cos \frac{\pi x}{a}$$

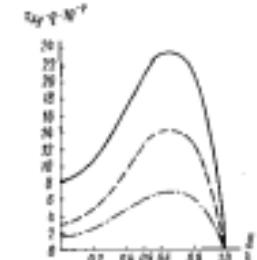


Рис. 37. Распределение касательных напряжений по длине клеевого шва.

$$-\frac{b}{2} \leq x \leq 0 \quad \tau_{xy} = \frac{b}{2} + \frac{b}{a} \cos \frac{\pi x}{a}$$

лены неравномерно и меняют свой знак. Величина максимальных нормальных напряжений зависит от Злины накладки. На рис. 37 видно, что касательные напряжения также распределены

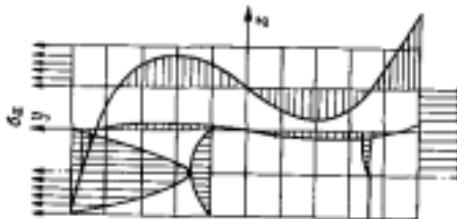
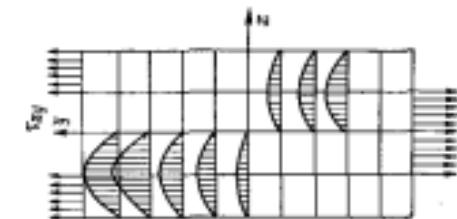
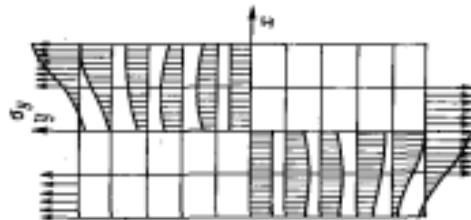


Рис. 38. Распределение составляющих напряжений  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$  и  $\sigma_z$  по кромкам пластины.

неравномерно по длине накладки, однако они сохраняют на всем протяжении касательного шага знак. Значения составляющих напряжений и характер распределения их по сечению показаны на рис. 38. На графиках рис. 39 показано распределение по длине накладки касательных и нормальных напряжений.

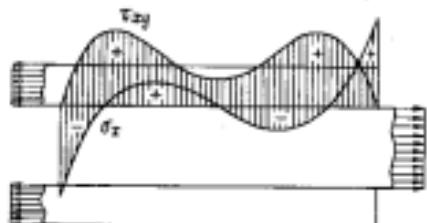


Рис. 39. Экспериментальное распределение  $\tau_{xy}$  и  $\sigma_x$  по длине накладки.

На основании изложенного можно сделать вывод, что увеличение длины накладки снижает величину касательных и нормальных напряжений σ<sub>x</sub> в классовом шаге и при определенной

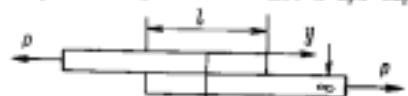


Рис. 40. Нахлестовое соединение.

длине накладки исчезающая способность соединения материала будет зависеть от предела прочности его при растяжении. Разрушающая нагрузка может быть подсчитана по формуле

$$P = \frac{\tau_{xy} b^2}{\beta}, \quad (47)$$

где β — коэффициент концентрации, учитывающий изменение сечения.

Задача о запрессованном состоянии соединений нахлестку без учета упругих характеристик классового слоя применительно к деревянным рассматривалась Голландом и Рейсснером. Решение этой задачи позволяет, как это будет видно дальше, сделать ряд важных практических выводов.

Рассмотрим работу соединения, представленного на рис. 40. Соединенные листы единичной шириной выполнены из одного и

того же материала одинаковой толщины δ. В результате эксцесса трицептиста приложения нагрузки по концам соединения возникает изгибающий момент, величина которого приближенно может быть определена из выражения

$$M = \frac{Pb}{2}.$$

Принимая σ<sub>0</sub> = Pδ и J = δ<sup>3</sup>/12, получаем выражение для определения действующих напряжений. Соответственно для правой и левой частей

$$\sigma'_x = \sigma_0 \left( 10 - 6 \frac{x}{l} \right) \text{ и } \sigma'_y = \sigma_0 \left( 6 \frac{x}{l} - 2 \right). \quad (48)$$

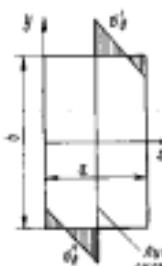


Рис. 41. Схема нагружения соединения в районе нахлестки.

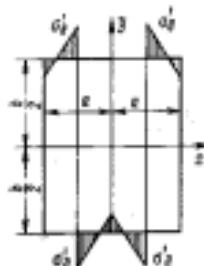


Рис. 42. Расчетная схема.

Отсечем район нахлестки и представим отсеченную часть как пластину с ограниченным контуром (2δ - a; l - b), загруженную на определенных участках нагрузкой σ<sub>0</sub>' и σ<sub>0</sub> (рис. 41).

Для решения задачи о величине и характере распределения напряжений в районе склейки могут быть использованы основные положения плоской задачи теории упругости изотропного тела. При этом принимаем схему решения и основные допущения, как у И. Ф. Папкова [77], применительно к полосам ограниченной длины, загруженным по продольным кромкам нагрузками, выраженнымными тригонометрическими рядами.

Исходя из условия равновесия пластину, изображенную на рис. 41, заменим пластиной, изображенной на рис. 42.

Нагрузку по верхней и нижней кромкам заменим непрерывной, разложив ее в ряд Фурье по ходинусам (нагрузка симметрична):

для верхнего края

$$F(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \frac{k\pi x}{a}, \quad (49)$$

для нижнего края

$$F_1(x) = b_0 + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos \frac{k\pi x}{a}.$$

Положим составляющие напряжений равными

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \\ \sigma_y &= \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}, \end{aligned} \quad (50)$$

где  $\varphi$  — функция Эри, которая, как известно, для электропластин подчиняется дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (51)$$

Функцию  $\varphi$  ищем в форме ряда

$$\varphi = \frac{a_0 x^2}{4} + \sum_{k=1}^{\infty} f_k(y) \cos \frac{k\pi x}{a}. \quad (52)$$

Требование (51) приводят к записи функции  $f_k(y)$  в форме

$$f_k(y) = R_k(y) + y S_k(y), \quad (53)$$

где функции  $R_k(y)$  и  $S_k(y)$  в общем виде выражаются равенствами

$$R_k(y) = A_k \frac{k\pi}{a} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} + B_k \frac{k\pi}{a} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a}; \quad (54)$$

$$S_k(y) = C_k \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} + D_k \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a}.$$

Для рассматриваемой нагрузки

при  $y = \frac{b}{2}$

$$\tau_{xy} = 0 \quad \text{и} \quad \sigma_y = F(x);$$

при  $y = -\frac{b}{2}$

$$\tau_{xy} = 0 \quad \text{и} \quad \sigma_y = F_1(x).$$

Решение уравнения (53) дает значение функции  $f_k(y)$  в виде

$$\left| \begin{aligned} f_k(y) &= 2 \frac{(\operatorname{sh} u + x \operatorname{ch} u) \operatorname{ch}(u_k y) - (u_k y) \operatorname{sh}(u_k y) \operatorname{sh} u}{\operatorname{sh} 2u + 2u}; \\ f_k(y) &= 2 \frac{x u \operatorname{ch}(u_k y) \operatorname{sh} u - x \operatorname{ch} u \operatorname{sh}(u_k y)}{\operatorname{sh} 2u + 2u}; \\ f_k'(y) &= 2 \frac{(\operatorname{sh} u - u \operatorname{ch} u) \operatorname{ch}(u_k y) + u_k y \operatorname{sh}(u_k y) \operatorname{sh} u}{\operatorname{sh} 2u + 2u}. \end{aligned} \right| \quad (55)$$

Здесь

$$u_k = \frac{k\pi}{a}; \quad u = u_k \frac{y}{2} = \frac{k\pi y}{2a}.$$

Напряжения вычисляются по формулам

$$\left| \begin{aligned} \sigma_x &= \sum_{k=1}^{\infty} 2a_k f_k(y) \cos \frac{k\pi x}{a}; \\ \sigma_y &= a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} 2a_k f_k(y) \cos \frac{k\pi x}{a}; \\ \tau_{xy} &= \sum_{k=1}^{\infty} 2a_k f_k'(y) \sin \frac{k\pi x}{a}. \end{aligned} \right| \quad (56)$$

Так как для соединений обычно  $b \gg 2a$  (длина нахлестки значительно больше толщины), то можно принять

$$\operatorname{sh} u \approx \operatorname{ch} u;$$

$$\operatorname{sh}(u_k y) \approx (u_k y).$$

Подставляя эти значения в (56) и положив  $\operatorname{sh} 2u = -2u$ , после преобразования получим

$$\left| \begin{aligned} f_k(y) &= \frac{\operatorname{sh}(u_k y) \left[ 1 + u_k \left( \frac{b}{2} - y \right) \right]}{2 \operatorname{sh} \left( u_k \frac{b}{2} \right)}; \\ f_k'(y) &= \frac{\operatorname{sh}(u_k y) \left[ u_k \left( y - \frac{b}{2} \right) \right]}{2 \operatorname{sh} \left( u_k \frac{b}{2} \right)}; \\ f_k'(y) &= \frac{\operatorname{sh}(u_k b y) \left[ 1 + u_k \left( y - \frac{b}{2} \right) \right]}{2 \operatorname{sh} \left( u_k \frac{b}{2} \right)}. \end{aligned} \right| \quad (57)$$

Выражение (57) может быть упрощено, если принять

$$\operatorname{sh}(a_1 x) \approx \frac{1}{2} e^{a_1 x^2} \text{ и } \operatorname{sh}\left(a_2 \frac{x}{2}\right) \approx \frac{1}{2} e^{a_2 \frac{x^2}{2}}.$$

Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  ряда Фурье могут быть найдены из следующих граничных условий

при  $0 < x < \frac{\delta}{2}$ ,  $\sigma_x = F(x) = 0$ ,

$$\text{при } \frac{\delta}{2} < x < \delta, \quad \sigma_x = F(x) = a_0 \left(10 - \frac{12x}{\delta}\right).$$

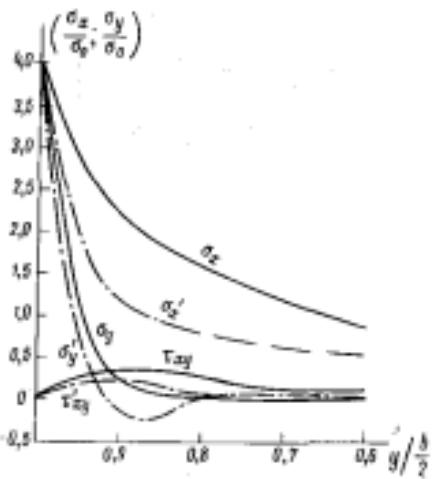


Рис. 43. Характер распределения напряжений по клеевому шву.

Приближенные значения напряжений в различных точках клеевого шва и характер их изменения в зависимости от длины пакладок показаны на графиках рис. 43 (штрих-пунктиром показаны приближения при  $a = \frac{\delta}{6}$ , сплошными линиями — при  $a = \frac{\delta}{2}$ ).

Рассмотрим работу соединения в условиях, показанных на рис. 44, а. Это общепринятая схема испытаний на прочность нахлесточных соединений. Закрепление в губках испытательных машин обеспечивает жесткую заделку концов. Ввиду экспоненциальности приложения нагрузки  $P$  склеенные элементы изгибаются так, как это показано на рис. 44, б, и стремятся занять положение, обеспечивающее наименьшую величину работы деформации.

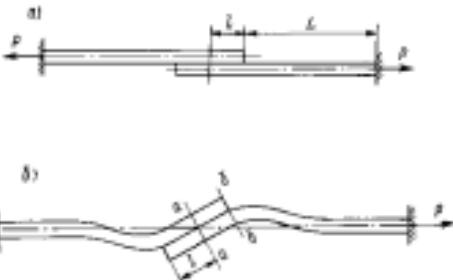


Рис. 44. Схема испытаний (а) и условие равновесия элементов соединения (сечение а—а и б—б).

Рассматривая условие равновесия элементов соединения (сечения а—а и б—б), можно написать:

$$P' \frac{\delta}{2} - NI + M = 0, \quad (58)$$

где  $N = P \sin \alpha$ ;

$$P' = P \cos \alpha;$$

$\alpha$  — угол поворота сечения.

Так как  $\alpha$  мало, то можно принять  $N = Pa$  и  $P' = P$ , тогда (58) переопределяется в виде

$$M = P \left( \alpha I - \frac{l_a}{2} \right). \quad (59)$$

Принимая  $\alpha I = l$ , можно приближенные значения максимальных напряжений на концах нахлестки определять по формуле

$$\sigma = 4a_0 - \sigma \frac{\lambda}{l_a}. \quad (60)$$

Из этого выражения и графика, помещенного на рис. 45, видно, что с увеличением гибкости  $\lambda/l_a$  увеличивается, а максимальные напряжения падают.

Величину угла поворота  $\varphi$  можно определить исходя из распределения балки, жестко заданной на одном конце и загруженной на другом моментом  $M$  и силой  $N$ .

Выражение для изгибающего момента (59) представится в виде

$$M = -P \frac{b}{2} \left( \frac{PL^2 + 2EI}{2EI + PL(L-2)} \right).$$

Из (60) следует, что величина изгибающего момента зависит от жесткостных и геометрических параметров склеиваемых элементов. Обозначая параметры соединений, выполненных из одинаковых материалов, соответственно индексами 1 и 2, из

(60) можно получить выражение для определения таких величин этих параметров, которые бы обеспечили условие  $M_1 = M_2$ :

I случай:  $I_1 = I_2$ ;

$$b_1 = b_2; \quad \frac{L}{I_1} = \frac{L}{I_2}; \quad E_1 \neq E_2;$$

$$\text{тогда } L = L_1 \sqrt{\frac{E_2}{E_1}};$$

II случай:  $b_1 = b_2$ ;

$$E_1 \neq E_2; \quad L_1 = L_2; \quad I_1 \neq I_2;$$

$$I_1 = I_2;$$

тогда  $b_2 = b_1 \frac{E_1}{E_2}$ , где  $b$  — ширина образца;

III случай:  $I_1 = I_2$ ;

$$I_1 \neq I_2; \quad L_1 = L_2; \quad E_1 \neq E_2;$$

тогда  $I_2 = I_1 \frac{PL_1^2 + 2EI_1}{PL^2 + 2EI_2}$ .

Из этих выражений видно, что при прочих равных условиях для сравнения прочности соединений, выполненных из разных материалов, необходимо при испытании назначать соответствующие размеры образцов. Сравнение же результатов испытаний соединений разных материалов, проведенных на образцах одинаковых размеров, может привести к неправильным выводам.

Рассмотрим прочность соединения с накладками, учтывая упругие характеристики kleевого шва. Современные методы расчета kleевых соединений с учетом упругих характеристик kleевого шва базируются главным образом на теоретических и экспериментальных исследованиях находящихся соединений

листов из однородных материалов (металлов) одинаковой толщины, подвергнутых растяжению вдоль плоскости склейивания. При этом иссущая способность соединения оценивается по величине максимальных сдвигающих и раздирающих усилий, возникающих во концах kleевого шва в результате различных деформаций соединенных элементов и эксцентриситета приложения нагрузки. Применительно к судовым конструкциям наибольший интерес представляют соединения с накладками, рассмотренные в работах [19], [45].

Накладки и соединяющие листы могут быть выполнены из разнородных материалов. Для определения величины и характера распределения напряжений в kleевом шве соединения (рис. 46, а),

учитывая симметричность системы, можно ограничиться рассмотрением только одной его части (рис. 46, б). При действии силы в результате деформаций склеиваемых элементов по длине kleевого шва в шве возникают касательные напряжения. При этом предполагается, что внешняя нагрузка уравновешивается интегралом нормальных напряжений в накладках и соединяющих местах; накладки обладают абсолютной и изгибайкой жесткостью; клей и склеиваемые материалы имеют до разрушения следуют закону Гука; толщины элементов соединения по всей длине шва постоянны; нормальные напряжения в соединяющих местах и накладках в касательных в kleевом шве по толщине распределены равномерно; материалы элементов изотропны и являются однородными.

Уравнение равновесия системы имеет вид:

$$\begin{aligned} \tau_k(x) - \tau_k(0) \frac{t_k}{\partial_x} &= \int_x^L \frac{1}{E J_k} \left( \int_0^x \tau_k(x) dx \right) dx - \\ &- \int_x^L \frac{1}{0.5 E J_k} \left( 0.5 P - \int_x^L \tau_k(x) dx \right) dx, \end{aligned} \quad (61)$$

где  $\tau_k(x)$  и  $\tau_k(0)$  — касательные напряжения соответственно в сечении kleевого шва с абсциссой  $x$  и на конце накладки;

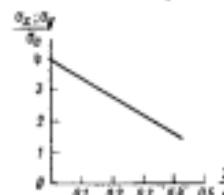


Рис. 45. Зависимость изгиба-  
вания в соединении от его  
глубины.

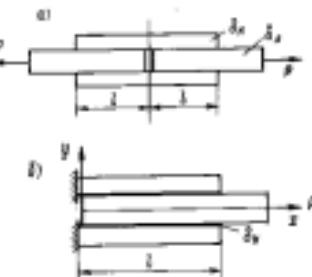


Рис. 46. Соединение с накладками (а) —  
расчетная схема (б).

Решение этого уравнения приводит к выражению, определяющему величину и закон распределения напряжения вдоль кляпового шва:

$$\begin{aligned}\tau_x(x) = & \frac{P_k}{\sqrt{M}} \frac{1}{e^{x/\delta_0} - e^{-x/\delta_0}} \left[ (1 + \varphi e^{-x/\delta_0}) e^{x/\delta_0} + \right. \\ & \left. + (1 + (\varphi e^{x/\delta_0}) e^{-x/\delta_0}) \right], \quad (62)\end{aligned}$$

где  $M=2k(1+\varphi)$ ;

$$M = 2k(1 + \varphi); \quad k = \frac{G_0}{\delta_0 \delta_0}; \quad \varphi = \frac{0.5 \delta_0}{\delta_0}; \quad B_0 = E_0 \delta_0; \quad B_0' = E_0 \delta_0'.$$

При однородных материалах, полагая  $\alpha = 2\sqrt{k}$  и  $\delta_0 = 0.5 \delta_0'$ , получим:

$$\tau_x(x) = \frac{P}{2} \sqrt{k} \frac{1}{e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}} \left[ (1 + e^{-\alpha x}) e^{\alpha x} + (1 + e^{\alpha x}) e^{-\alpha x} \right]. \quad (63)$$

Напряжения в районе стыка листов и на конце накладок, т. е. при  $x=0$  и  $x=l$ , будут равны

$$\tau_x(0) = \tau_x(l) = \frac{P}{2} \sqrt{k} \frac{1}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} (2 + e^{-\alpha l} + e^{\alpha l}). \quad (64)$$

Для соединений с одной накладкой уравнение (14) сохраняет силу при замене 0,5Р на Р, а

$$M \text{ за } M_1 = k \left( 1 + \frac{\delta_0}{\delta_0} \right),$$

тогда

$$\tau_x(0) = \tau_x(l) = \frac{P \sqrt{k}}{\sqrt{2}} \frac{1}{e^{x/\delta_0} - e^{-x/\delta_0}} (2 + e^{x/\delta_0} + e^{-x/\delta_0}). \quad (65)$$

На рис. 47 приводятся графики, показывающие влияние длины накладки на величину максимальных касательных напряжений, вычисленных по формулам (64) и (65) для соединений с одной и двумя накладками. Приняты следующие параметры:  $E_0 = E_0 = 0.7 \cdot 10^4 \text{ кГ/см}^2$ ;  $G_0 = 0.5 \cdot 10^4 \text{ кГ/см}^2$ ;  $\delta_0 = 0.2 \text{ мм}$ ;  $\delta_0' = \delta_0'' = 4.0 \text{ мм}$ ;  $\delta_0''' = 4.0 \text{ мм}$ ;  $\delta_0'''' = 2.0 \text{ мм}$  (величины, обозначенные одним и двумя штрихами, относятся соответственно к соединениям с одной и двумя накладками). По оси  $y$  отложена величина  $\tau$ , пропорциональная величине напряжения сдвига, причем  $\tau_{\max} = \pm P$ .

Из этих графиков видно, что с увеличением длины накладок максимальные напряжения соединений с одной и двумя накладками уменьшаются до определенных величин с одновременным снижением их разницы, причем эта разница после достижения длии накладок определенной величины становится постоянной и не превышает 50%.

Из (65) можно видеть, что такое пренебрежение является максимально возможным для соединений с любыми параметрами. На рис. 48 приводятся графики, показывающие влияние толщины и упругих характеристик элементов соединения с одной и двумя накладками ( $k = \frac{G_0}{\delta_0 \delta_0}$ ) на величину максимальных касательных напряжений. Из графиков видно, что с увеличением жесткости соединяемых элементов ( $B_0$ ) напряжения в том и другом случае уменьшаются. При этом изменение длины накладки в большей мере оказывается на иссущей способности соединения с одной накладкой.

На рис. 49 приведены графики, построенные по результатам экспериментальных исследований соединений с одной и двумя

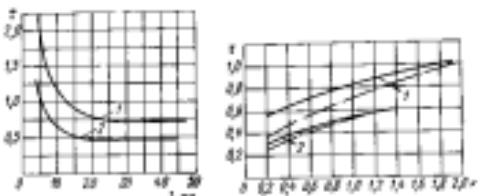


Рис. 47. Влияние длины накладки на величину максимальных касательных напряжений.  
— 1 — одна накладка;  
— 2 — две накладки.

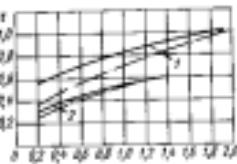


Рис. 48. Влияние толщины и упругих характеристики соединения на величину максимальных касательных напряжений.  
— 1 — одна накладка;  
— 2 — две накладки.

накладками. По оси  $y$  отложены среднеарифметические величины разрушающих нагрузок, полученные при испытаниях шести типоразмеров образцов. По оси  $x$  отложены величины толщины силикайда. Образцы склеивались клеем ЭП-1.

Как видно из графиков, экспериментальные исследования подтверждают ранее высказанное положение о том, что установка двух накладок при определенной однозависимости длине их увеличивает прочность соединения не более чем в 1,5 раза.

На рис. 50 приводятся графики, показывающие влияние упругих свойств склеиваемых материалов на величину максимальных касательных напряжений, значение которых для различных отношений  $\varphi = \frac{E_0}{E_0'}$  вычислялось по формуле (62) при  $x=0$  и  $x=l$ . При этом было принято:  $G_0 = 0.5 \cdot 10^4 \text{ кГ/см}^2$ ;  $\delta_0 = 0.2 \text{ мм}$ ;  $\delta_0' = 0.6 \text{ мм}$ .

Графики показывают, что при различных упругих характеристиках склеиваемых материалов и материалов накладок

равенство максимальных напряжений во концах накладок нарушается, причем при увеличении отношения  $\frac{E_2}{E_1}$  напряжения в месте стыка увеличиваются, а на конце накладок уменьшаются, что в конечном счете снижает несущую способность соединения.

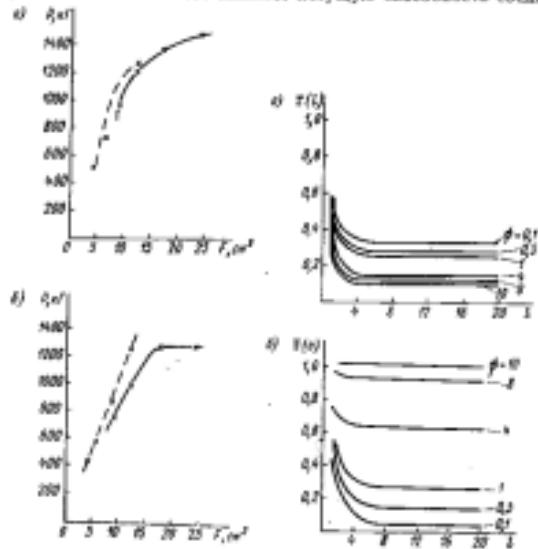


Рис. 49. Зависимость разрушающей нагрузки от площади склейки: а — сталь+сталь; б — АМ1р=30+АМ2р=30.  
— — — соединение с одной накладкой; — — — соединение с двумя накладками.

Рис. 50. Влияние упругих свойств основанных материалов на величину максимальных контактных напряжений: в — в месте стыка; б — на концах накладок.

ния. При уменьшении  $\varphi$  наблюдается обратная картина, однако интенсивность увеличения максимальных напряжений на концах накладок значительно ниже.

Рассмотрев такие соединения, можно сделать вывод, что наиболее благоприятные условия нагружения клеевого шва будут при однотипных материалах элементов соединения, листов и накладок, так как при этом снижается разница их деформаций и тем самым уменьшается напряжение.

Если выразить значение коэффициентов, входящих в (63) и (64), через безразмерный параметр  $j = \frac{40\mu^2}{c_0 E_2}$ , то после некоторой преобразованной выражения до определения напряжений в клееом шве могут быть представлены в виде

$$\tau_{\infty}(x) = \frac{P}{4l} \sqrt{T} \frac{1}{e^{jT} - e^{-jT}} \left[ (1 + e^{-jT}) e^{\frac{x}{l} jT} + (1 + e^{jT}) e^{-\frac{x}{l} jT} \right]; \quad (66)$$

$$\tau_{\infty}(l) = \tau_{\infty}(0) = \frac{P}{4l} \sqrt{T} \frac{1}{e^{jT} - e^{-jT}} (2 + e^{-jT} + e^{jT}). \quad (67)$$

Из (67) видно, что снижение максимальных напряжений при увеличении  $T$  будет проходить до тех пор, пока они не достичнут определенной величины, обусловленной значением  $j$ . Дальнейшее увеличение длины накладки не уменьшит максимальных напряжений, и соединение тем самым испытывает свою несущую способность. Выражение для определения максимальных напряжений принимает в этом случае простой вид

$$\tau_{\max} = \frac{P}{4l} \sqrt{T}, \quad (68)$$

Используя (68), можно проанализировать влияние различных параметров соединения на прочность клеевого шва.

Условие, при котором обеспечивается равномерность распределения контактных напряжений по площади склейки, можно определить методом последовательных приближений из выражения

$$V \sqrt{(2 + e^{-jT} + e^{jT} - e^{-jT})}$$

и записать в виде  $V \sqrt{T} \leq 0,75$ .

Критерий  $j$  содержит в себе величину  $\frac{\sigma_u}{\sigma_0}$ , определение которой связано с известными трудностями, так как клей в присутствии склеиваемых материалов приобретает новые свойства, и, кроме того, определить точную толщину клеевого шва не представляется возможным.

Для поиска величины  $\frac{\sigma_u}{\sigma_0}$  могут быть использованы зависимости (68) и результаты испытаний образцов при различных длинах накладки. Выражение (68) получено из условия  $V \geq 5$ . Длина накладки, обусловливающая постоянство разрушающей нагрузки  $P_{\text{max}} = \text{const}$ , снимается с эксперимен-

тальной кривой. Тогда в первом приближении при оптимальной длине накладки  $\frac{\delta_{\text{опт}}}{l_0} = \delta \frac{B_a}{B}$ .

При падении экспериментальных кривых для других  $\delta_a$  значение  $\frac{\delta_a}{l_0}$  может быть уточнено из решения уравнение (68) методом последовательных приближений.

На рис. 51 приводятся экспериментальные и теоретические кривые зависимостей максимальных касательных напряжений от

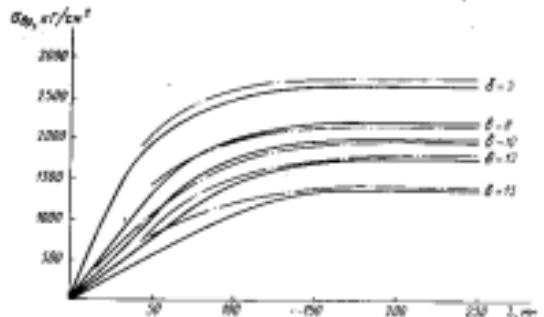


Рис. 51. Зависимость максимальных касательных напряжений от длины накладки соединений при различных толщинах сцепляемых листов.

длины накладки соединений стеклоэластиков при различных толщинах сцепляемых листов.

Экспериментальные кривые обозначены сплошными линиями, теоретические — пунктирными.

При построении теоретических кривых  $\tau_{\text{th}} = \frac{P_{\text{опт}}}{l_0 \cdot \delta}$  по выражениям (67) и (68) за базу принималась экспериментальная кривая для  $\delta_a = 1,0$  см. Тогда при  $E_a = 1,7 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup> и оптимальной длине  $l = 17,5$  см

$$\frac{\theta}{l_0} \approx 0,3 \cdot 10^4; \quad \tau_{\text{th},1} \approx 130 \text{ кг/см}^2.$$

Сравнение теоретических и экспериментальных кривых показывает, что предлагаемый способ определения величины  $\frac{\theta}{l_0}$  и использующий способность соединений по выведенным формулам может быть использован при практических расчетах.

### § 13. Прочность стыковых kleевых соединений при изгибе

Рассматриваемые судовые конструкции в основном подвергаются действию поперечных нагрузок и претерпевают деформацию изгиба.

Была предпринята попытка на базе основных положений теории составных стержней вывести основные зависимости, позволяющие оценить прочность kleевых соединений при изгибе. Рассматривалось соединение с двумя накладками. Предполагалось, что при изгибе касательные напряжения в kleевом слое, как и в случае растяжения, возникают в результате взаимных смещений склеиваемых поверхностей. Кроме того, пренебрегая скатием kleевого слоя, считали, что взаимные сдвиги элементов соединения следуют тому же закону, что и при отсутствии kleевого слоя, и прогиб всего соединения в середине его длины при симметричной нагрузке пропорционально кривизне его в среднем сечении. Основываясь на предположение независимости действия сил, поставленную задачу расчленяли на два самостоятельных решения: в первом налине стыка соединяемых листов не учитывалось, во втором учитывалось.

При изгибе соединения без учетастыка деформация kleевого слоя  $\Delta_a$  может быть определена на основании экспериментальных данных в выражении

$$\frac{\tan \delta_a}{l_0} = \Delta_a, \quad (69)$$

где  $\Delta_a$  — деформация kleевого слоя, соответствующая максимальному усилию сдвига;

$\tan \delta_a$  — максимальные касательные напряжения, определяемые из условия недельной прочности kleевого слоя при равномерном изгибе.

На основании принятых допущений можно записать

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_0} + \frac{1}{\rho_a}, \quad (70)$$

где

$$r = r_0 + r_a,$$

$\frac{1}{r_0}$  — кривизна соединения;

$\frac{1}{\rho_a}$  — кривизна соединения в предположении его монолитности;

$\frac{1}{\rho_a}$  — кривая отдельных элементов соединения в предположении свободного сдвига по швам;  $r_0, r_a, \rho_a$  — прогибы, отвечающие соответствующей кривизне.

Полагая моменты, возникающие в каждом рассмотренном случае, пропорциональными соответствующим составляющим полной кривизны  $\frac{1}{R_k}$  и  $\frac{1}{R_s}$  или же состоящими прогиба  $v_k$  и  $v_s$  и моментам инерции, можем написать

$$M = M_k + M_s \quad (71)$$

или же

$$M = v_k I_k + v_s I_s,$$

где  $M$  — полная величина разрушающего изгибающего момента ( $M_k$  и  $M_s$  — его составляющие);

$I_k$  — момент инерции всего сечения;

$I_s$  — момент инерции отдельных элементов соединения (равен сумме моментов инерции вкладок и листа).

Учитывая относительно малые величины прогибов элементов конструкций, можно полагать, что искривление соединения будет происходить по синусоиде.

Тогда составляющие прогибов найдутся из выражения

$$v_s(x) = v_{s\max} \sin \frac{\pi}{l} x, \quad (72)$$

При  $x=0$  (на конце накладки)

$$\frac{dv_s(x)}{dx} = \operatorname{tg} \vartheta \text{ и } v_{s\max} = \frac{l \operatorname{tg} \vartheta}{\pi},$$

где  $\vartheta$  — угол поворота за опоре;  
 $l$  — длина накладки.

Этот угол может быть определен с помощью рис. 50 ( $\operatorname{tg} \vartheta = \frac{2S_k}{l}$ ), где показано сдвиг по швам соединения на конные накладки.

Из условия

$$M_s = EI_s \frac{\partial v}{\partial x}; \quad v_s = \frac{M_s x^2}{cEI_s}, \quad (73)$$

Сдвигущие усилия в клеевом шве могут быть найдены из выражения

$$N = \int_0^{12} \tau(x) dx = \frac{2N_{\max}}{l} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \frac{x}{l} x dx = \frac{2N_{\max}}{l}, \quad (74)$$

Однако при  $x=0$

$$\tau(0) = \frac{2N_{\max}}{l} \cos \frac{0}{l} x = \frac{N_{\max}}{l} = \tau_{\max}, \quad (75)$$

где  $N$  и  $N_{\max}$  — сдвигущие усилия в шве из середины длины и на конце накладки соответственно;  $\tau_{\max}$  — максимальные касательные напряжения на конце накладки.

$$\text{При } 0 < x < \frac{l}{2}, \quad N = \frac{M_s x}{I_s},$$

где  $S_k$  — статический момент сечения накладки относительно оси всего сечения.

Подставляя это значение в (75), получим

$$\tau_{\max} = \frac{\pi M_s S_k}{I_s l}. \quad (76)$$

Используя выражение (71), получим окончательно

$$\tau_{\max} = \frac{c_{\text{пр}} M_s S_k}{I_s l}, \quad (77)$$

$$\text{где } \mu = \frac{M_s}{M}.$$

Отсюда видно, что установка двух накладок при изгибе соединения не увеличивает прочность соединения в два раза по сравнению с соединением, выполненным с одной накладкой или анкерлестку при одинаковой длине kleевого шва. Из (73), выразив  $M_s$  через  $\tau_{\max}$  и положив  $\delta_k = \frac{1}{2} \delta_s$ , получим

$$\tau_{\max} = \frac{3.5 M_s}{4 c l}. \quad (78)$$

Из графика (рис. 53) видно, что при  $\eta \rightarrow 0$   $\bar{\tau} \rightarrow 1$ , где  $\eta = E / \frac{G_k}{G_s}$  и  $\tau_{\max} = \frac{\pi M}{I_s l}$ , следовательно,  $\mu \rightarrow 1$  и  $M = M_s$ , т. е. соединение можно рассматривать как исполнит. При  $\eta \rightarrow \infty$   $\bar{\tau} \rightarrow 0$ , т. е.  $\mu \rightarrow 0$ ,  $\tau_{\max} \rightarrow 0$ , т. е. происходит свободный сдвиг. С уменьшением жесткости kleевого шва  $\frac{G_k}{G_s}$  и увеличением жесткости склеиваемых элементов напряжение в kleевом шве снижается, что объясняется разгрузкой шва за счет восприятия части нагрузки отдельно работающими элементами соединения (лист и накладки). Это также показывает, что kleевые соединения пластмасс, у которых  $E / \frac{G_k}{G_s} = 0.5 + 1 + \frac{t_k}{l} < 0.05$ , можно большей частью рассматривать как исполнит.

Влияние длины накладки на величину максимальных напряжений показано на графике (рис. 54), при этом принято  $E = 0.7 \cdot 10^6 \text{ кГ/см}^2$ ;  $G_k = 0.5 \cdot 10^4 \text{ кГ/см}^2$ ;  $\delta_k = 0.2 \text{ мм}$ ;  $\delta_s = 4.0 \text{ мм}$ ,  $t_k = 2 \text{ мм}$ .



Рис. 52. Схема деформаций kleевого шва при изгибе соединений с накладками.

Из графика видно, что с ростом длины накладки интенсивность снижения напряжений уменьшается. Критерии оптимальной длины накладки в этом случае может явиться необходимая несущая способность соединения при достижении в материале опасных напряжений. При  $\delta_{\text{н}} = \frac{1}{2} \delta_0$  и  $\mu=1$  из условия разно- прочности необходимая длина должна быть

$$l > 0,6 \frac{\delta_0}{\gamma_{\text{нек}}} . \quad (79)$$

Неплотность и зазоры в стыках соединений с накладками практически вероятны. При изгибе стыка могут раскрываться, что уменьшает рабочее сечение и вызывает дополнительное на-

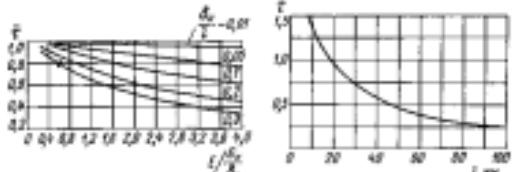


Рис. 33. Зависимость величины  $\gamma$  от параметра клеевого соединения.

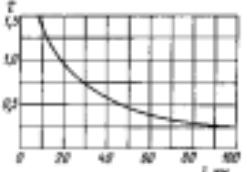


Рис. 34. Зависимость  $\gamma$  от  $\delta_0/\delta_0$ .

тружение шва. Кроме того, соединение может подвергаться значительному изгибу, причем растянутый при предыдущем нагружении стык может иметь остаточную деформацию. Для определения дополнительных напряжений, возникающих в клееном шве при наличии стыка, делая ошибку в безопасную сторону, принимаем, что нагружение шва в пределах половины накладки усиливается, являющимися следствием изгибающего момента, равномерно, причем напряжения, вызываемые этими усилиями в клееном шве, равны максимальным, т. е.

$$\tau = \frac{2N}{l} \quad \text{и} \quad N = \frac{M_{\text{д}} l}{2I_1} ,$$

где  $N$  — нормальные силы, действующие в накладках в районе стыка при изгибе;

$M$  — действующий момент в сечении стыка;

$I_1$  — момент инерции всего сечения без учета площади соединяемых листов.

Отсюда после несложных преобразований получим выражение для определения необходимой длины накладки:

$$> 0,25 \frac{\delta_0}{\gamma_{\text{нек}}} . \quad (80)$$

Сравнивая (79) и (80), можно видеть, что при выборе оптимальной длины накладки нужно исходить из условия обеспечения необходимой прочности по концам накладки, при этом в районестыка прочность клеевого шва будет обеспечена.

Таким образом, максимальные напряжения сдвига при изгибе соединений возникают по концам накладок и в районестыка соединяемых листов. Величина их зависит от геометрических и упругих параметров всех элементов соединения.

С увеличением длины клеевого шва напряжения в нем падают, и критерии оптимальной длины накладки следует считать условие обеспечения равной прочности исхода из напряжений по концам накладки.

Принимая во внимание упругие и геометрические параметры элементов соединений конструкционных пластмасс, применяемых в судостроении, можно рассматривать соединения их при изгибе в расчетном отношении как монолит.

#### § 14. Специфика работы тавровых (или угловых) клеевых соединений при отрыве

Прочность соединения при отрыве является одной из основных прочностных характеристик клеевого шва. Определение этой величины входит в число стандартных испытаний клеевых соединений на образцах определенных размеров в предположении идеального случая равномерного распределения нагрузки и деформации клеевой прослойки по всей площадке соединения.

На условность этого допущения при склеивании различных материалов было указано в работах [135], [137]. Очевидно, что в реальных судовых конструкциях подобное нагружение клеевого шва может иметь место в весьма редких случаях.

В последние времена приобретают большое распространение испытания на неравномерный отрыв (отрыв) от жесткого основания. Однако результаты такого вида испытаний не могут быть перенесены на соединения из других материалов, так как прочность клеевого соединения в этом случае зависит от геометрических и упругих параметров склеиваемых элементов. Напряжения в клееном шве вычисляются по формуле изгиба балок, лежащей на упругом основании и загруженных на конце силой или моментом.

Применимко судовым конструкциям наибольший интерес представляет изучение работы соединений различного рода жесткостей с обшивкой, крепежной фундаментов и т. п., выполняемых с помощью специальных угольников.

На рис. 55 показаны два возможных случая отрыва угловых соединений от основания.

При решении задачи о распределении и величине напряжений в клеевом шве соединений, работающих по первой схеме, предполагается, что:

1) наличие клеевых швов не оказывается на величине и характере распределения действующих усилий;

2) между деформациями и напряжениями в элементах соединений существует линейная зависимость;

3) отрывающая нагрузка передается на шов только уголниками, размеры которых обеспечивают равномерность распределения нормальных напряжений по толщине вертикальной полки.

Распределение напряжений в клееной шве по вертикальной полке уголника при отрыве углового соединения от жесткого

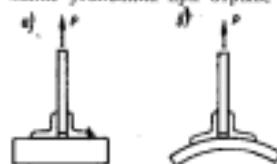


Рис. 55. Возможные случаи отрыва угловых соединений от основания: а — жесткое основание; б — гибкое основание.

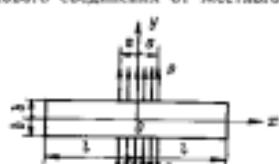


Рис. 56. Расчетная схема для определения напряженного состояния клеевого соединения: а — жесткое основание; б — гибкое основание.

основания, очевидно, будет таким же, как в случае растяжения соединения с двумя вкладышами.

Результаты испытаний таких соединений показали, что разрушение соединений при одинаковых размерах полок уголника происходит по горизонтальной площади склейки, т. е. в результате отрыва, а не сдвига.

На основании принятой допущений задача сведена к расчету прямоугольной пластины, загруженной из определенных участках симметричной равномерной нагрузкой, как это показано на рис. 56.

Как следует из [100], выражение для определения напряжений в срединной плоскости такой пластины имеет вид:

$$\sigma_y = \frac{P}{2l} + \frac{2p}{\pi b} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{k\pi b}{l}}{k} \times \\ \times \frac{\frac{k\pi b}{l} \operatorname{ch} \frac{k\pi b}{l} + \operatorname{sh} \frac{k\pi b}{l}}{\left( \frac{k\pi b}{l} \right)^2 - 2 \frac{k\pi b}{l}} \cos \frac{k\pi b}{l} \quad (81)$$

где  $b = a$  — толщина полки уголника;  
 $l$  — ширина полок;

$$P = q \cdot 2b,$$

Представим это уравнение в форме:

$$\sigma_y = \sigma_{sp} \left[ \frac{b}{l} + \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{\sin \frac{k\pi b}{l}}{k} \times \right. \right. \\ \left. \times \frac{\frac{k\pi b}{l} \operatorname{ch} \frac{k\pi b}{l} + \operatorname{sh} \frac{k\pi b}{l}}{\left( \frac{k\pi b}{l} \right)^2 - 2 \frac{k\pi b}{l}} \cos \frac{k\pi b}{l} \right) \left. \right], \quad (82)$$

$$\text{где } \sigma_{sp} = \frac{P}{2l}.$$

Используя уравнение (82), можно определять величину и характер распределения действующих отрывающих напряжений по всей площади склейки соединения, имеющего различные параметры.

На графиках, приведенных на рис. 57, по оси ординат отложена величина  $\sigma_y$ , пропорциональная величине отрывающих напряжений, причем  $\sigma = \sigma_{sp}$ . Цифрами I, II и т. д. обозначены краевые, построенные соответственно для случаев: I — при  $b/l = 0,06$ ; II — при  $b/l = 0,1$ ; III — при  $b/l = 0,2$ ; IV — при  $b/l = 0,5$ .

Графики показывают, что с ростом ширины полки уголника неравномерность распределения напряжений по срединной плоскости (по ширине) возрастает. С увеличением ширины полки при данной толщине максимальные действующие напряжения практически не изменяются и остаются равными 0.

При определении разрушающей нагрузки величины отрывающих напряжений может быть назначена по результатам

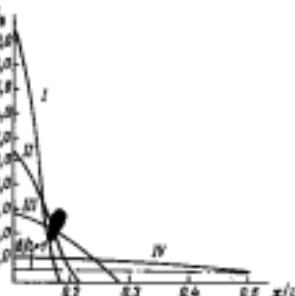


Рис. 57. Характер распределения напряжений в прогибающем угловом соединении при отрыве.

испытаний стандартных образцов, обеспечивающих при отрыве равномерное распределение напряжений по всей площади склейки.

Для соединения из клея, имеющих относительно низкие значения модуля нормальной упругости, задача по определению напряжений в краевом шве может быть сведена к известным расчетам балок на упругом основании.

На рис. 58 представлены графики зависимости разрушающей нагрузки от ширины полки соединительного уголника, построенные по результатам теоретических и экспериментальных исследований соединений, выполненных из уголниках из стали марки Ст. 3 и алюминиевого сплава АМг-5В.

Теоретические разрушающие нагрузки (штрих-пунктирные линии) вычислялись из условия  $\sigma = \frac{P}{2BL}$ , которое было

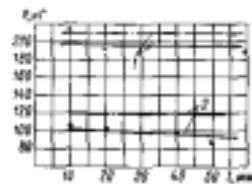


Рис. 58. График зависимости разрушающей нагрузки от ширины полки соединительного уголника:  
1—Ст. 3 + стеклопластик; 2—АМг-5В + стеклопластик; 3—стеклопластик разрушение внутренних экспериментальных данных.

составлено по результатам стандартных испытаний на отрыв соединений образцов из этих же материалов. Экспериментальные кривые (сплошные линии) построены по усредненным результатам испытаний образцов пяти типоразмеров. В качестве клея применялись эпоксидные композиции на основе смолы ЭД-5. Жесткость основания (плиты из стеклопластика на полизифирной смоле ПН-1) обеспечивалась специальными приспособлениями. Размеры образцов при одинаковой длине уголников ( $L=30$  мм) были выбраны для ширин полки  $b=10; 20; 40; 60$  мм; для АМг-5В  $b=2$  мм;  $t=10; 20; 40; 50$  мм.

Характер изменения разрушающей нагрузки при испытании таких соединений в достаточной мере подтверждает положение о независимости величины ее от ширины горизонтальной полки уголника.

Сравнение численных значений нагрузок по теоретическим и экспериментальным данным позволяет принять к заключению о возможности приближенной оценки несущей способности угловых соединений при отрыве их от жесткого основания по результатам испытаний стандартных образцов на отрыв, причем можно предположить, что степень точности такого вычисления при достаточно большой ширине горизонтальных полок уголника увеличивается с увеличением их толщины.

При очень малых толщинах (экспериментальная кривая для

угольников из АМг-5В) нагрузка на краевой шов практически передается в одной точке и соединение начинает работать в условиях чистого «отрыва», что снижает его засущую способность.

Следует еще раз подчеркнуть, что все предыдущие выводы распространяются только на случаи отрыва углового соединения от жесткого основания. Невозможность использования их для оценки несущей способности соединений, работающих в других условиях, иллюстрируется табл. 23.

Испытания угловых соединений проводились по схеме, представленной на рис. 59. Основание крепилось в специальном приспособлении, обеспечивающем свободную опору на концах. Были приняты следующие размеры элементов: толщина листа основания 3 мм, ширина образца 90 мм, размеры уголников 30×30×9×9 мм.

Как видно из табл. 23, изменение расстояния между опорами весьма значительно сказывается на величине разрушающей нагрузки. Очевидно, что распределение напряжений, отсюда и прочность угловых соединений, при гибком основании зависят от геометрических размеров и упругих свойств материалов склеиваемых элементов и клея. Геометрические и упругие параметры склеиваемых элементов определяют и условия загружения краевого шва. Так, при сравнимой изгибной жесткости полок уголника и основания под действием отрывающих усилий они могут изгибаться совместно и краевой шов будет нагружен касательными и нормальными напряжениями, величина и характер распределения которых зависит от стрелки прогиба; при жестких уголниках изгиб основания вызывает отрыв листа на концах горизонтальных полок, и прочность соединения определяется величиной напряжений именно в этом месте.

Из сказанного следует, что аналитическое описание напряженного состояния краевого шва при такой работе соединения с учетом всех факторов представляет значительные трудности. Принятая оценка прочности соединений при отрыве по результатам стандартных испытаний образцов применительно к реальным судовым конструкциям может вызвать значительную ошибку в опасную сторону, так как прочность соединения при такой работе зависит от гибкости основания.

При отрыве углового соединения от жесткого основания нагрузка на шов передается участком, ограниченным толщиной

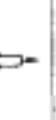


Распределение напряжений при изгибе стальных панелей с краевыми соединениями из углеродистой стали

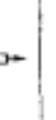
Схема панели	Конструктивная обработка	(Номер классификации)	(При отрыве от края соединения)	Изгибающие напряжения		
				$\frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{нн}}}$	$\frac{P_{\text{нн}}}{P_{\text{ннн}}}$	$\frac{P_{\text{ннн}}}{P_{\text{нннн}}}$
Симметрическое	Симметрическое	650	—	650	—	—
		3800	190	190	20	26
		3800	190	20	165	7,4
Асимметрическое	Угловое соединение (расстояние между осями 70 мм)	3800	190	20	20	—
		3800	190	20	165	7,4
		3800	190	20	165	7,4



Угловое соединение (расстояние между осями 70 мм)



Угловое соединение (расстояние между осями 300 мм)



вертикальной полки уголника, в несущую способность соединения может быть оценена по величине напряжений, равномерно распределенных на этом участке. В случае относительно малых толщин полок уголников напряжения в клееющем шве следует определять с учетом упругих характеристик кляя.

При отрыве углового соединения от гибкого основания необходимо производить экспериментальное определение его прочности, причем условия нагружения соединения при лабораторных испытаниях должны максимально приближаться к загрязнениям.

### § 15. Специфика работы тавровых (или угловых) краевых соединений при изгибе

При решении задачи об изгибе тавровых соединений — задачи о напряженном состоянии соединяющего набора с обшивкой с помощью уголников — необходимо рассмотреть вопрос не только о величине и характере касательных напряжений в клееющем шве, которые могут привести к нарушению линейности, но также и нормальных напряжений (отрывающих напряжений в шве), которые, как указывалось в работе [95], являются одной из причин, обуславливающих необходимость нормирования стрелки прогиба балок.

Приведенные исследования имеют целью выяснить, от каких факторов зависит величина напряжений, отрывающих набор от пластины при изгибе пластины, подкрепленной ребрами, в сечении порядка этих напряжений.

Ограничимся рассмотрением пластины, у которой одна сторона опорного контура значительно меньше другой, причем подкрепляющие ребра направлены вдоль короткой стороны опорного контура (рис. 60, а). Пластина загружена равномерно распределенной нагрузкой  $q$ . Будем различать два варианта конструктивного оформления концов ребер:

- ребро лежит до кромки пластины и закреплено вместе с ней на опоре (рис. 60, б);

- ребро не доводится до кромки пластины (рис. 60, в).

Первый вариант называется рациональным. В этом случае первоначально пластина в ее соединении с набором будут действовать нормальные напряжения порядка

$$\sigma = q \frac{h}{l}, \quad (83)$$

где  $h$  — расстояние между ребрами;

$l$  — ширина соединения ребра с пластиной (суммарная ширина горизонтальных полок соединительного уголника).

В зависимости от направления действия нагрузки напряжения будут сжимающими либо растягивающими. Очевидно, что

эти напряжения не представляют опасности для конструкции и таким образом не требуют нормирования стрелок прогибов.

При втором варианте (см. рис. 60, в) ребро не воспринимает непосредственно внешних усилий, а загружено только реакцией пластины. Эпюра загрузки, действующей на ребро, оче-

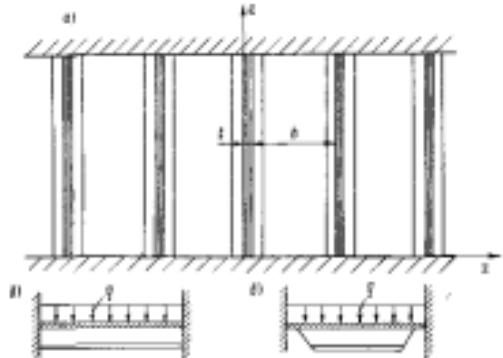


Рис. 60. Конструкция переборки в расчетной схеме ее структуры.

видно, имеет вид, показанный на рис. 61, где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — соответственно растягивающие и сжимающие напряжения.

Неблагоприятность второго варианта объясняется тем, что здесь передача перерезывающей силы балке осуществляется через полку, в то время как при нормальной работе балки перерезывающие усилия практически полностью воспринимаются стенкой.

Отсюда вытекают две практические задачи:  
— оценка влияния перераспределения напряжений на концы ребер на общий изгиб системы пластина — ребро;  
— оценка работоспособности соединений ребро — пластина.

Для решения первой задачи могут быть использованы обычные формулы изгиба балок, которые дают вполне удовлетворительную точность расчета прогона и напряжений в составной балке ребро — пластина. Балку при этом следует считать свободно опертой по концам.

Рис. 61. Эпюра нагрузки, действующей за счет давления переборки.

по концам ребер на общий изгиб системы пластина — ребро;

— оценка работоспособности соединений ребро — пластина.

Для решения второй задачи могут быть использованы обычные формулы изгиба балок, которые дают вполне удовлетворительную точность расчета прогонов и напряжений в составной балке ребро — пластина. Балку при этом следует считать свободно опертой по концам.

Вторая задача является специфической для пластмассовых конструкций, так как для металлической конструкции отвечающие напряжения в соединении пластина — ребро не опасны. При решении этой задачи рассматривается плоская деформация пластины, т. е. считается, что ребра расположены достаточно часто, чтобы обеспечить в районе их окончания изгиб пластины по цилиндрической поверхности. Таким образом приходим к расчетной схеме, приведенной на рис. 62. На жестком основании закреплена нижней поверхностью пластина, загруженная на торце касательными усилиями, некоторым образом распределенными во высоте сечения.

Математическая формулировка задачи сводится к нахождению функции напряжений  $f(x, y)$ , удовлетворяющей бигармоническому уравнению

$$\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} = 0. \quad (84)$$

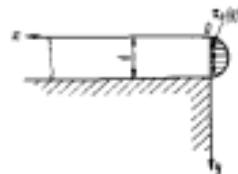


Рис. 62. Расчетная схема пластины в составе переборки.

Поскольку исследуемый эффект имеет местный характер, очевидно, допустима замена конечной пластины полубесконечной, неограниченно протяженной в направлении оси  $x$ . Тогда граничные условия будут

на кромке  $x=0$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 0; \quad -\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y^2} = \tau_y(y), \quad (85)$$

на кромке  $y=0$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = 0, \quad (86)$$

на кромке  $y=b$  — деформация в направлении оси  $x$

$$z_x = -\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (87)$$

где  $u$  — перемещение в направлении оси  $x$ ;

$v$  — перемещение в направлении оси  $y$ :

$$v = 0; \quad (88)$$

и бесконечности все компоненты напряжений равны нулю:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \varphi = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 f}{\partial x^4} = \dots = 0. \quad (89)$$

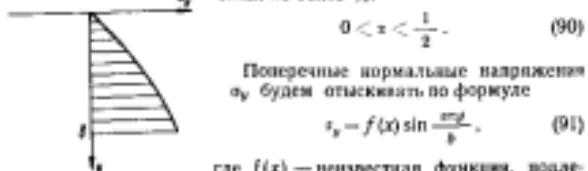
Таким образом, мы имеем дело с плоской задачей теории упругости полубесконечной пластины, причем часть граничных условий задана в напряжениях, а часть в перемещениях. Такие задачи относятся к числу наиболее сложных в теории упругости.

Приближенное решение ее можно свести к следующему.

Будем аппроксимировать распределение поперечных нормальных напряжений в пластине по толщине пластины функцией

$$\sin \frac{\pi y}{b}.$$

Поскольку эпюра распределения напряжений  $\sigma_y$  имеет вид, изображенный на рис. 63, коэффициент  $\alpha$  может принимать значения не более  $1/b$ :



Поперечные нормальные напряжения  $\sigma_y$  будем отыскивать по формуле

$$\sigma_y = f(x) \sin \frac{\pi y}{b}, \quad (91)$$

где  $f(x)$  — неизвестная функция, подлежащая определению.

Учитывая, что

$$\sigma_y = \frac{\partial \gamma}{\partial x},$$

багармоническое уравнение (84) примет вид:

$$F^{IV}(x) \sin \frac{\pi y}{b} - 2F'(x) \left( \frac{\pi}{b} \right)^2 \sin \frac{\pi y}{b} + \\ + F(x) \left( \frac{\pi}{b} \right)^4 \sin \frac{\pi y}{b} + \gamma^{IV}(y) x + \varphi_2^{IV}(y) = 0, \quad (92)$$

где  $F = \int_0^x dx \int_0^y f(x) dx$ .

Последнее уравнение эквивалентно системе

$$\varphi_1^{IV} = 0; \quad \varphi_2^{IV} = 0; \quad F^{IV} - 2F' \left( \frac{\pi}{b} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{b} \right)^4 = 0. \quad (93)$$

Общие интегралы первых двух уравнений этой системы имеют вид

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= A_1 y^2 + A_2 y^3 + A_3 y + A_4; \\ \varphi_2 &= B_1 y^2 + B_2 y^3 + B_3 y + B_4. \end{aligned} \quad (94)$$

Выполнение условия  $\lim_{x \rightarrow \infty} \varphi = 0$  возможно лишь при

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = B_1 = B_3 = B_4 = 0. \quad (95)$$

Или, что то же самое,

$$\varphi_1(y) = 0, \quad \varphi_2(y) = 0. \quad (96)$$

Характеристическое уравнение последнего из систем (93) имеет вид

$$k^4 - 2k^2 \left( \frac{\pi}{b} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{b} \right)^4 = 0,$$

или

$$\left[ k^2 - \left( \frac{\pi}{b} \right)^2 \right]^2 = 0.$$

Отсюда можно записать

$$k_{1,2} = \frac{\pi}{b}; \quad k_{3,4} = -\frac{\pi}{b}.$$

Общее решение последнего из уравнений (93) будет

$$F(x) = C_1 e^{-\frac{\pi x}{b}} + C_2 x e^{-\frac{\pi x}{b}} + C_3 e^{\frac{\pi x}{b}} + C_4 x e^{\frac{\pi x}{b}}, \quad (97)$$

где  $C_i$  — константы интегрирования.

Из условия  $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 0$  следует  $C_3 = C_4 = 0$ . Подчиняя ф-нию  $(\varphi_2)_{x=0} = 0$ , получим при  $x = 0$   $C_1 = 0$ .

Касательные напряжения и торцовое сечение

$$(\tau)_x=0 = C_2 \left( \frac{\pi}{b} \right) \cos \frac{\pi y}{b}. \quad (98)$$

Интеграл от касательных усилий на торце должен быть равен суммарной перерезывающей силе. Очевидно, что задав закон изменения напряжений по высоте, можно удовлетворить условиям на торце не только в общей форме. Тогда

$$N_0 = \int_0^b (\tau)_x dy = C_2 \left( \frac{\pi}{b} \right) \int_0^b \cos \frac{\pi y}{b} dy = \\ = C_2 \left( \frac{\pi}{b} \right) \sin \frac{\pi y}{b} \Big|_0^b = C_2 \sin \pi \frac{b}{\pi}, \quad (99)$$

Отсюда находим последнюю постоянную интегрирования:

$$C_2 = \frac{N_0}{\sin \pi \frac{b}{\pi}}, \quad (100)$$

где  $N_0$  — внешняя перерезывающая сила, приходящая на единицу ширины пластины.

Одноточечные функции напряжений

$$\gamma = \frac{N_0}{\sin \alpha} x e^{-\frac{\pi x}{b}} \sin \frac{\pi x}{b}. \quad (101)$$

Нормальные напряжения  $\sigma_y$  будут

$$\tau_y = \frac{\partial \gamma}{\partial x} = \frac{N_0 \cos \alpha}{\sin \alpha b} e^{-\frac{\pi x}{b}} \left[ \frac{\pi x}{b} - 2 \right] \sin \frac{\pi x}{b}. \quad (102)$$

Реакция основания

$$\gamma(x) = (\sigma_y)_{x=0}$$

или

$$\gamma(x) = N^{\frac{\pi}{b}} e^{-\frac{\pi x}{b}} \left[ \frac{\pi x}{b} - 2 \right]. \quad (103)$$

Отрывающие напряжения в крайней точке соединения

$$\gamma(x) = -2 \pi e \frac{N_0}{b}. \quad (104)$$

Наибольшей величины эти напряжения достигают в случае  $\alpha = \frac{1}{3}$ . Тогда верхняя граница максимальных отрывающих напряжений

$$\sigma_{\text{отр}} = -\frac{N_0}{b}, \quad (105)$$

т. е. максимальные отрывающие напряжения могут быть порядка утроенных средних касательных напряжений в торцовом сечении пластины.

До сих пор мы принимали, что ширина соединения совпадает с шириной пластины. Если считать шириной соединения ширину приформовки, то в общем случае отрывающие напряжения должны вычисляться по формуле

$$\sigma_{\text{отр}} = \pi \frac{N_0}{b} \frac{\lambda}{1-\lambda}. \quad (106)$$

Распределение реакции вдоль оси имеет максимум. В случае  $\alpha = \frac{1}{3}$  величина реакции отыскивается из условия  $\gamma' = 0$

или

$$e^{-\frac{\pi x}{b}} \left( \frac{N_0}{b} - 3 \right) = 0.$$

Отсюда точка максимума  $x = \frac{6b}{\pi}$  и отрывающие напряжения в этой точке

$$\sigma_y = \frac{N_0}{b} = \frac{\pi}{48}. \quad (107)$$

Крайние распределения напряжений приведены на рис. 64, а. В случае ребра конечной длины распределение напряжений может быть изображено в) кривой, приведенной на рис. 64, б.

Полученное решение не противоречит ядов нормирования прочности соединения ребра с пластиной. Однако нормирование прочности соединения путем ограничения прогибов целая призвана соравливанием, так как отрывающие усилия находятся в прямой зависимости, как показывает приведенный расчет, от касательных напряжений на споре пластины, которые, таким образом, не идентичны относительному прогибу.

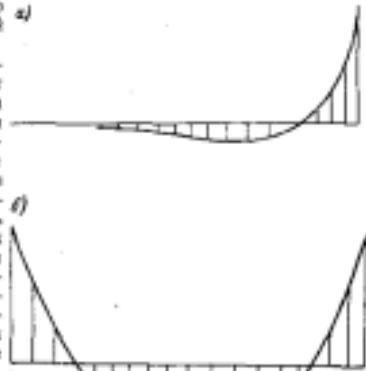
Очевидно, в опасных случаях следует нормировать непосредственно прочность самого соединения.

Опасным является случай действия нагрузки со стороны пластины, если ребро не доведено до кромок пластины. Очевидно, следует рекомендовать доводить ребро до кромок. Если же по каким-либо причинам сделать этого нельзя, следует рекомендовать конструктивные мероприятия по усиление соединения ребра с пластиной в районе концов, во всяком случае обязательно расчет этого соединения.

### § 16. Другие способы соединений

Наряду с положительными, клястые соединения имеют и свои отрицательные свойства, главные из которых следующие:

- сравнительно низкая теплостойкость, обусловленная органической природой клея;



- б) относительно низкая прочность при неравномерном отрыве (отдирании или расслаблении);  
 в) необходимость применения нагрева и давления при склеивании изделий некоторыми марками клеев;  
 г) отсутствие надежных методов контроля качества клеевых соединений в готовых изделиях без разрушения (при правильном осуществлении процесса склеивания и хорошем постоперационном контроле это не является существенным недостатком).

Вследствие этого соединения, применяемые в пластмассовых и композитных конструкциях листроек, рубок, переборок и выгородок, могут осуществляться также с помощью крепежных изделий (болтов, винтов, заклепок) или комбинированным способом.

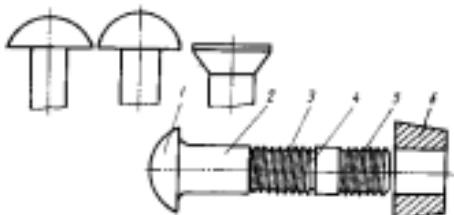


Рис. 65. Заклепка болт-заклепка.

1 — головка головки; 2 — слойный замыкающий участок; 3 — резьба с накатанными концентрическими ребрами; 4 — разъемная шейка; 5 — штангина; 6 — обжимная колпачок.

Однако следует отметить некоторую осторожность в применении на практике механических соединений, что обусловливается известными отрицательными сторонами этого способа и свойствами пластмассовых материалов. К последним в первую очередь следует отнести большую чувствительность пластмасс к надрезам и к ущербу (при краевом), а также склонность к ползучести.

Поэтому при выборе типа механических соединений необходимо располагать данными о прочности материала, ослабленного отверстием, величинами сопротивления смятию и сразу, а также непосредственными экспериментальными данными о прочности самих соединений, позволяющими проверить установленную методику рационального выбора основных параметров. Такими параметрами при заданной толщине листового материала  $b$  являются диаметр заклепки или болта  $d$ , шаг между заклепками  $f$ , минимальное расстояние от центра заклепки до свободного края  $a$ , расстояние между рядами  $c$ .

На судах применяются почти все существующие виды механического крепежа: болты, заклепки, винты, болт-заклепки. Параметры болтов и заклепочных соединений можно выбирать согласно положенным в работе [83] рекомендациям. Наиболее выгоден большой шаг резьбы шурупов или винтов, поскольку он увеличивает их держащую способность. Учитывая, что пластмассы очень чувствительны к динамическим нагрузкам, особенно к локальным, возникающим в процессе клаеки, для соединения пластмасс целесообразно применять болт-заклепки, которые довольно широко используются в авиастроении (рис. 65).

## Глава V

### ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПЛАСТИМАССОВЫХ НАДСТРОЕК, РУБОК, ПЕРЕБОРОК

#### § 17. Общие положения

В настоящее время конструктивные решения надстроек, рубок и переборок из стеклопластика нельзя считать оптимальными и окончательно установленными. Это объясняется прежде всего недостатком опыта и влиянием методов выполнения конструкций из пластмасс. Тем не менее накопленные данные позволяют сформулировать основные требования, которые должны предъявляться к пластмассовым конструкциям, а также и основные положения, которые должны учитываться при конструировании. Пластмассовые конструкции должны:

- выполняться из недефицитных материалов, обеспечивающих их технологичность, минимальный вес и минимальную стоимость;
- иметь хороший вид и обеспечивать удобство эксплуатации;
- иметь максимально возможное количество унифицированных элементов;
- по возможности изготавливаться целями, без соединений;
- изготавливаться с применением несложной и дешевой оснастки и обеспечивать возможность максимальной механизации технологических процессов;
- позволять при необходимости обеспечивать подо- и газонепроницаемость отдельных узлов соединений.

При конструировании необходимо принимать во внимание следующие положения:

1. Процессы изготовления материала и конструкция неразрывны. Это позволяет выделять конструкции монолитными, с плавными переходами толщин, с необходимыми внутренними усилениями и дает возможность удешевить и улучшить их путем выбора соответствующих форм (в частности, цилиндрических поверхностей). Имеется также возможность получения точных расчетных размеров элементов конструкций.

2. При применении пластмасс на основе смол горячего отверждения материал на судостроительное предприятие поставляется в виде готовых листов; свойства его определяются соответствующими ТУ. Материал может поставляться в виде трехслойных панелей с различными заполнителями, а также в виде коробчатых панелей. Поскольку такого рода пластмассы обладают повышенной тяжести, применять их следует в местах, исключающих появление значительных ударных нагрузок. Текстура поверхности листов может быть различной. Заполнитель в трехслойных панелях может выполнять роль тепло- и звукоизоляции.

3. При выборе формы продольного и поперечного сечения надстроек следует руководствоваться условиями эксплуатации (необходимостью обеспечения постоянной высоты помещения, удобства размещения жилых и служебных помещений и т. п.) и общей архитектурой судна. При этом следует ориентироваться на изготовление конструкций сложных форм. Учитывая характер работы надстроек, обусловливающий возможность выбора размеров их с翼ий из условий только местной прочности, наиболее целесообразной системой набора для стоечек (однотрубных) надстроек следует считать поперечную, которая позволяет избежать большого количества пересечения балок набора, упростить технологию и снизить трудоемкость изготовления конструкций.

Для набора надстроек выбор системы набора определяется их конструкцией и действующими усилиями.

Малая нагруженненность надстроек из пластмасс, устанавливаемых на металлический корпус, простота изготовления конструкций любой формы благоприятствуют улучшению внешнего вида надстроек.

#### § 18. Выбор материала

Экономия в весе надстроек и переборок, которая может быть получена при применении новых материалов, зависит как от условий работы этих конструкций в составе корпуса, так и механических характеристиках материала, из которых они изготовлены. В технике принято в первом приближении оценивать целесообразность применения того или иного материала по его сравнительной прочности, характеризуемой отношением его прочностных параметров  $\sigma_t / \sigma_r$  к удаленному весу. Применительно к стеклопластикам такая оценка может привести к ошибочным выводам, поскольку их свойства зависят от большого числа различных факторов.

Для предварительной оценки целесообразности применения пластмасс в качетве металлов в какой-либо конструкции можно воспользоваться приближенными зависимостями [96] с учетом специфики данного материала.

Сравним, например, вес пластин, изготовленных из стали марки Ст. 4с, из легких сплавов АМг-5В и алюминиевого стеклопластика (табл. 24).

Таблица 24  
Прочностные и упругие характеристики материалов

Характеристика	Пластмассовые материалы		
	Сталь марки Ст. 4с	АМг-5В	Стеклопластик
Продукт прочности сеч. $\sigma_y \cdot E / \text{кН}^2$	6300	2900	Растяжение по основе 2700 + утку 1700 Сжатие по основе 2000 + утку 1200
Продукт текучести $\sigma_y \cdot E / \text{кН}^2$	2400	1300	—
Остаточное напряжение $\sigma_p \cdot E / \text{кН}^2$	$\sigma_p$	$\sigma_p$	$k\sigma_p$ ( $k=0,8$ )
Деформационное напряжение $[e]_d \cdot E / \text{кН}^2$	$n \sigma_d$	$n \sigma_d$	$n \sigma_d$ ( $n=0,9$ )
Модуль упругости $E \cdot \text{кН}^2/\text{мм}^2$	$2,1 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^5$	0,18 · $10^5$ — основа 0,12 · $10^5$ — утку
Расчетный модуль упругости $E_{pr} \cdot \text{кН}^2/\text{мм}^2$	$E$	$E$	$nE$ ( $n=0,4-0,5$ )
Удельный вес, $\text{кг}/\text{м}^3$	7,85	2,82	1,70

Если предположить, что из пластины из различных материалов действует одинаковая по величине всперечная равномерно распределенная нагрузка  $q$ , а толщина этих пластин при одинаковой ширине и длине выбрана таким образом, чтобы в каждой из них возникли допускаемые для материала пластины напряжения, то изменение веса пластины из условий разной прочности определяется выражениями

$$\frac{P_{cr}}{P_{sa}} = \left( \frac{\sigma_{sa}}{\sigma_{cr}} \cdot \frac{E_{sa}}{E_{cr}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\tau_{cr}}{\tau_{sa}}; \quad (108)$$

$$\frac{P_{cr}}{P_{sa}} = \left( \frac{[e]_{sa}}{[e]_{cr}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\tau_{cr}}{\tau_{sa}}.$$

Здесь и в дальнейшем:

$P_{cr}$  и  $\tau_{cr}$  — вес и удельный вес стальной пластины;

$P_{sa}$  и  $\tau_{sa}$  — то же пластмассовой пластины;

Коэффициенты  $\sigma_{cr}$  и  $\sigma_{sa}$  представляют собой численные множители в выражении для расчетных изгибающих моментов  $M_{cr} = k_{cr} \cdot q b^2$ ;  $M_{sa} = k_{sa} \cdot q b^2$ .

Для изогнутой пластины в соответствии с [95]  $M_x - M_y = -0,0513 \cdot q b^3$  (квадратная пластина);  $M_y = 0,0833 q b^3 > M_x$  (удлиненная пластина).

Для стеклопластика с рассматриваемыми упругими характеристиками при направлении оси  $x$ :  $M_x = 0,0648 q b^3$  (квадратная пластина);  $M_y = 0,0478 q b^3$  (удлиненная пластина);  $M_y = 0,0838 q b^3 > M_x$ .

Подставляя данные, приведенные в табл. 24, получим:

— квадратная пластина

$$\frac{P_{cr}}{P_{sa}} = 1,75; \quad \frac{P_{cr}}{P_{sa}} = 2,18, \text{ отсюда } \frac{P_{sa}}{P_{cr}} = 0,8;$$

— удлиненная пластина

$$\frac{P_{cr}}{P_{sa}} = 1,88; \quad \frac{P_{cr}}{P_{sa}} = 2,18, \text{ отсюда } \frac{P_{sa}}{P_{cr}} = 0,77.$$

Таким образом, если вес пластмассовой пластины принять за 100%, то вес алюминиевой пластины составит около 80%, а стальной примерно 175%. Если исходить из условия обеспечения равной жесткости пластин, можем соответственно получить:

— квадратная пластина

$$\frac{P_{cr}}{P_{sa}} = 1,31; \quad \frac{P_{cr}}{P_{sa}} = 2,05 \text{ и } \frac{P_{sa}}{P_{cr}} = 0,64;$$

— удлиненная пластина

$$\frac{P_{cr}}{P_{sa}} = 1,28; \quad \frac{P_{cr}}{P_{sa}} = 2,05 \text{ и } \frac{P_{sa}}{P_{cr}} = 0,625.$$

Считая вес пластмассовой пластины за 100%, получим, что вес алюминиевой пластины составляет величину порядка 60—65, а вес стальной пластины порядка 130%.

Аналогичный анализ можно провести и в случае других деформаций пластины, а также балок набора. Нужно отметить, что несмотря на очевидную условность таких расчетов, они в первом приближении позволяют оценить экономию в весе. Сравнение полученных численных значений показывает, что в рассмотренных условиях наиболее целесообразным материалом является алюминиево-магниевый сплав. Тем не менее можно

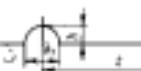
Таблица 25

## Минимальные толщины стенок и балок надстроек, мм

Тип обшивки-надстройки	Обивка стеклокомпозитом (однослоистая)	Обивка калубы	Наружные слои прозрачных стенок
Сатиновая стеклопластик	2,5	4,0	2,0
Жгутовая стеклопластик	3,0	5,0	2,0

Таблица 26

## Варианты гофрированных переборок из стеклопластика

Сечение переборки	Наклонные торцы	Толщина листа, мм	Размеры гофров, мм (ширина-высота)				Примечание: высота гофров, мм
			ширина гофра под обшивкой	ширина гофра под калубой	высота гофра	ширина гофра	
	Закрытые	2-3	60	—	—	50	200-300
	Открытые	3-5	45	20	30	—	250
			50	25	40	—	350

Соединение листов однослоистых обшивок стеклокомпозитом между собой, а также листов настиков палуб надстроек можно осуществлять, как показано на рис. 66. Соединение стеклокомпозитом с настиков палубами, а также продольных стеклокомпозитом с торцовыми можно осуществлять, как показано на рис.

Переборки могут изготавливаться из стеклопластика и других пластических однослоистых с набором, гофрированных, трехслойных с различными заполнителями (минваты, сотовопластик, асбестолит и т. д.), а также в виде готовых панелей (с заполнителями, коробчатых и др.).

Минимальные толщины полотнищ переборок из стеклопластика следует принимать такими же, как для обшивки стенок

предположить, что и применение стеклопластика для изготовления легких судовых конструкций весьма эффективно.

Выбор того или иного типа армирующего стеклополимерных и структуры армирования наряду с условиями работы конструкции определяется технологическими и экономическими соображениями. При конструировании из стеклопластика однослоистых обшивок, настиков палуб надстроек и полотнищ переборок целесообразно применять стеклопластик, что позволяет снизить трудоемкость изготовления конструкций и уменьшить их стоимость. Если же используется стеклопакет, следует выбирать параллельную структуру с направлением оси вдоль длины секции (стенки, палубы), для однослоистых спорных переборок — параллельную структуру с направлением оси вдоль высоты переборки, а для однослоистых раздвигательных — параллельную структуру с направлением оси вдоль длинной стороны переборки. При конструировании наружных и внутренних пасущих трехслойных панелей целесообразно применять параллельную структуру с направлением оси вдоль длинной стороны панели. При конструировании балок набора и приформованных угольников лучше применять параллельную структуру с направлением оси вдоль балок. Для увеличения пасущей способности балок при формировании их свободных концов можно использовать одностороннюю кординную ткань, расположив ее снизу вдоль балок.

### 5.19. Стенки и настиков палуб надстроек, листы переборок

Конструкции обшивок стенок и настиков палуб надстроек из стеклопластика могут быть однослоистыми с набором или трехслойными.

При выборе той или иной конструкции следует учитывать, что однослоистые конструкции по сравнению с трехслойными просты в изготовлении, надежны как при статических, так и при динамических нагрузках, допускают простые методы соединения элементов и крепления деталей каскадации, обладают меньшим водоупорицением, легко контролируются в процессе изготовления.

Трехслойные конструкции позволяют получить наиболее рациональное распределение материала с одновременным обеспечением прочности и жесткости. Трехслойные конструкции могут обеспечивать тепло- и звукоизоляцию. Как показал опыт [23], толщины обшивок стенок и настиков палуб надстроек из стеклопластика должны быть не менее указанных в табл. 25. Однослоистые обшивки стенок надстроек могут выполняться гофрированными (табл. 26). Профиль гофров бывает коробчатым или полукруглым.

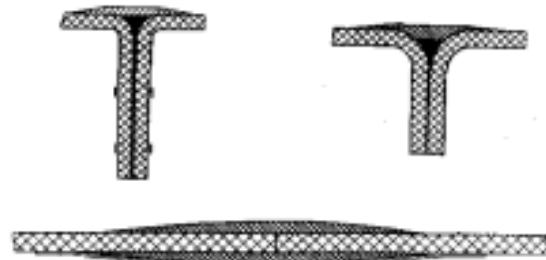


Рис. 66. Узлы соединений листов стекла и панелей вагонов.



Рис. 67. Узлы соединений стекол с панелями.

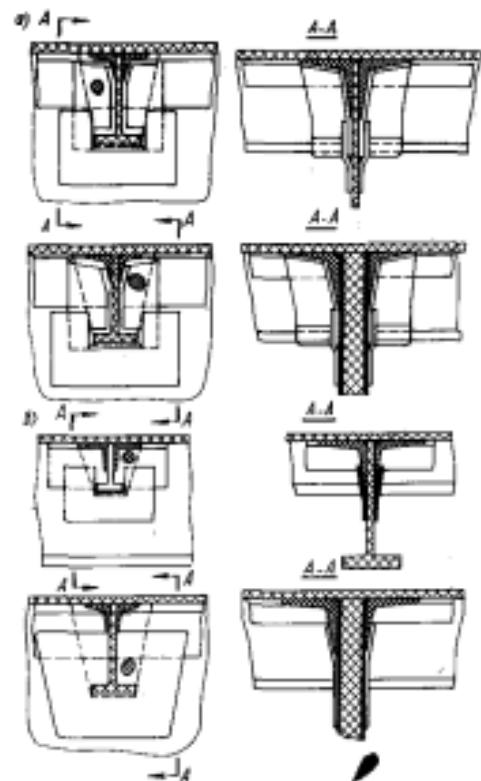
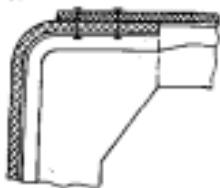


Рис. 68. Узлы привода блоков изображения: а — через проектирование; б — через звропадение.

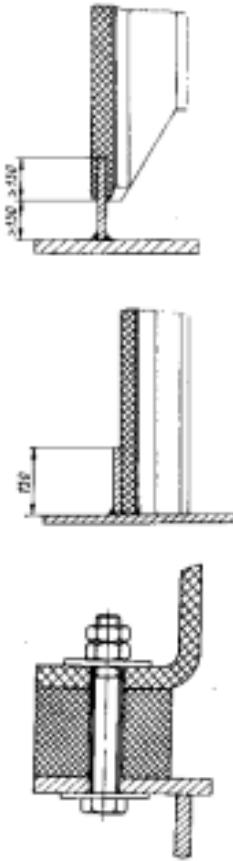


Рис. 69. Узлы стеклопластиковых конструкций с палубой.

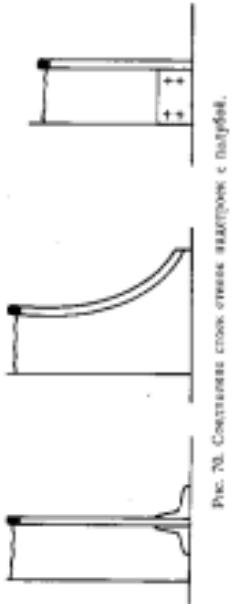


Рис. 70. Схематичные схемы отрывов настенных конструкций с палубой.

надстроек. При проходе балок набора через переборки узлы прохода выполняются, как показано на рис. 68.

Выбор способа крепления надстроек и переборок определяется как из конструкций и материалом, так и материалом тех конструкций, к которым они крепятся. При установке одностойловых обшивок стенок надстроек в полотнищах переборок из металлическую палубу крепление их может осуществляться с помощью клеммоболтовых (克莱мзаклепочных) соединений, приформованных приваркой к палубе металлического элемента, аформованного в елочку, как показано на рис. 69.

Крепление указанных конструкций на палубе из стеклопластика осуществляется в основном с помощью приформованных утолщиков. Стойки стелок к переборкам крепятся к палубе с помощью приформованных утолщиков или металлических планок на болтах (рис. 70). Соединение стенок надстроек и переборок трехслойной конструкции, а также переборок из панелей с палубами осуществляется, как указано в главе VII.

Подкрепление дверей и других выходов может осуществляться утолщением листов или установкой дополнительных ребер жесткости.

#### 8.29. Балки набора

Задача назначения профиля балок набора сводится к подбору таких форм и размеров их поперечных сечений, которые обеспечивают выполнение условий прочности и устойчивости

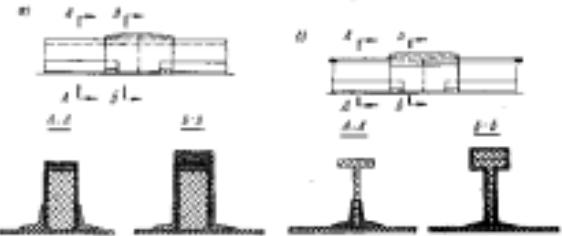


Рис. 71. Узлы соединений балок набора.

при наименьшей затрате материала. Как известно, применительно к металлическим балкам этот вопрос исследован достаточно полно и результаты исследований доведены до практических рекомендаций. Особенности стеклопластиков, очевидно, не предоставляют возможность использовать эти результаты в пластмассовом судостроении.

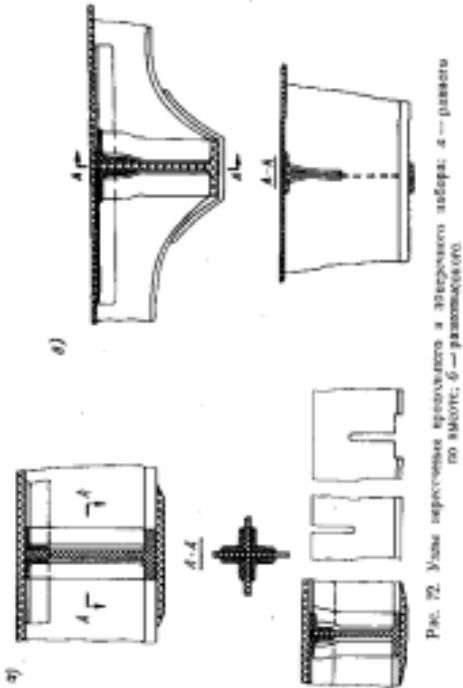


Рис. 72. Установка кирпичного каркасного якоря на балку: а — разрез; б — развертка.

При выборе профиля необходимо также принимать во внимание специфику технологии изготовления балок набора и соединения их с обшивкой.

В качестве набора для надстроек из стеклопластика рекомендуется применять коробчатые (рис. 71, а) и тавровые (рис. 71, б) балки. Балки коробчатого типа могут быть с заполнителем (текстолитом или деревом) и без него. При этом нужно иметь в виду, что применение деревя в качестве заполнителя позволяет не устанавливать дополнительные обрешетки для крепления зашивки.

С обшивкой набор соединяется с помощью двухсторонних приформовочных угольников. Балки короб-

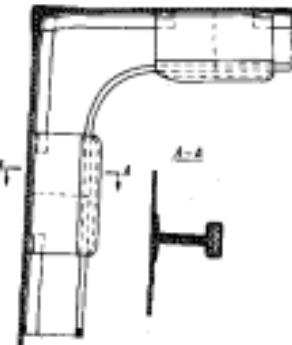


Рис. 73. Соединение стойки с балкой.

чатого типа с заполнителем могут приформовываться к обшивке одновременно с их изготовлением. Соединение балок набора между собой осуществляется с помощью соединительных приформовочных накладок (рис. 71), а пересечение их выполняется, как показано на рис. 72. Балки набора стенок и палуб надстроек соединяются с помощью книж и соединительных приформовочных накладок (рис. 73).

## Глава VI

### ПРОЧНОСТЬ ПЛАСТИМОССОВЫХ ЛЕГКИХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

#### § 21. Общие положения

Особенности пластмассовых материалов обуславливают необходимость разработки специальных, новых методов расчета выполняемых из них конструкций. Сложность такого рода расчетов заключается не только в определении величины напряжений и деформаций, но и в правильной оценке несущей способности пластин в конструкциях, которая зависит от технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов. Это прежде всего относится к стеклопластикам холдного отверждения, как в силу специфики изготовления конструкций из них, так и из-за особенностей их компонентов. Физико-механические характеристики конструкций из стеклопластиков определяются в процессе формования и во многом зависят от параметров этого процесса: давления и температуры, влажности и чистоты воздуха, качества оснастки и выполнения к т. п. Отсюда вытекает необходимость не только разработки оптимальных методов и режимов формования, обеспечивающих стабильность свойств пластин, но и учета при проектировании технологической предыстории конструкции, с тем чтобы более правильно оценить несущую способность материала в конструкции.

При изготовлении конструкций методом кратковременного формования, осуществляемого практически без применения давления, очевидно имеет место большая вероятность появления дефектов, свойства материала могут меняться в больших пределах и являются менее стабильными.

Как показал опыт, свойства стеклопластиков зависят также от размеров и формы конструкций. Даже при строгом соблюдении технологии свойства стеклопластиков, близких к табличным, можно получить только при формировании конструкции простой формы и малых размеров. В настоящее время по существу отсутствуют теоретические разработки, позволяющие установить зависимость свойств стеклопластика от технологии,

конструкционных и эксплуатационных факторов. Поэтому установление оптимальных режимов и оценка влияния окружающей среды на свойства материалов и т. д. ведется экспериментальным путем.

В отечественном судостроении в результате довольно обширных исследований [96] получены экспериментальные данные, позволяющие установить численные значения коэффициентов, с помощью которых с той или иной степенью точности оценивается несущая способность материала в судовых конструкциях.

Основные особенности стеклопластиков, обусловливающие специфику методов расчета изготавливаемых из них конструкций, следующие:

- зависимость свойств от марки связующего, типа стеклонаполнителя и структуры армирования;
- анизотропия упругих и прочностных свойств;
- отсутствие пластических деформаций вплоть до разрушения;
- никакие величины модулей нормальной упругости и сдвигов склонность к изменению прочностных и упругих свойств в зависимости от условий внешней среды;
- склонность к ползучести, возрастающая по мере увеличения температуры;
- зависимость прочностных и упругих свойств от технологии и условий изготовления конструкций.

Степень анизотропии упругих и прочностных свойств стеклопластика зависит от типа стеклоармированного наполнителя и структуры армирования. В расчетах отношения стеклопластика рассматривается как однородный ортотропный материал. Анизотропия свойств материала должна учитываться при расчете прочности и жесткости пластины, базах набора и переходах, а также при назначении величины присоединенного пояса обшивки, работающего совместно с балкой набора. При расчете сечения балок набора (момента инерции и момента сопротивления) нужно учитывать различие в величинах модулей упругости элементов профилей (стенок, поясков), обусловленные применением различных стеклонаполнителей или разных структур армирования.

Ввиду склонности стеклопластика к изменению прочностных и упругих свойств за опасные изгибающие и расчетные упругие параметры для него должны приниматься некоторые условные величины, зависящие от технологии изготовления конструкции, ее размеров и формы, а также условий эксплуатации.

Численные значения коэффициентов, приведенные в работе [95], очевидно могут быть использованы только для материалов, рассмотренных в этой работе; при применении других материалов они должны назначаться по результатам соответствующих испытаний. При этом за исходное значение прочностных

параметров стеклопластика принимается наименьшая из двух величин — предел прочности при растяжении и сжатии.

Поскольку за надстройки и переборки действуют только кратковременные нагрузки, при назначении коэффициентов за- висимости стеклопластика можно не учитывать. Влияние изгиба модуля сдвига стеклопластика определение стрелок простира, а также проверка устойчивости элементов конструкций должна производиться с учетом сдвига.

Величина опасных напряжений определяется по выражению:

— для нормальных напряжений

$$\sigma_0 = k \sigma_{sp};$$

— для касательных напряжений

$$t_0 = k t_{sp},$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий снижение прочностных свойств материала (из основания экспериментальных данных);

$\sigma_{sp}$ ,  $t_{sp}$  — пределы прочности материала при соответствующих видах деформаций (при лабораторных испытаниях сухих образцов).

Расчетные упругие параметры определяются по выражениям:

— для модулей нормальной упругости

$$E_p = n E;$$

— для модулей сдвига

$$G_p = n G,$$

где  $n$  — коэффициент, учитывающий снижение упругих свойств материала (из основания экспериментальных данных);

$E$ ,  $G$  — модули нормальной упругости и сдвига (при лабораторных испытаниях сухих образцов).

Для стеклопластиков, армирующих материал которых обработан гидрофобно-адгезионными составами, коэффициенты  $k$  и  $n$  могут быть приняты равными  $k=0,5$ ,  $n=0,7$ , с неборботанным гидрофобно-адгезионным составом —  $k=0,3$ ,  $n=0,4$ ; для пластмасс горячего отверждения —  $k=0,85$ ,  $n=0,9$ .

Величина опасных напряжений для металлических и деревянных элементов, входящих в состав пластмассовой конструкции, назначается в соответствии с действующими нормами в судостроении.

Допускаемые напряжения для элементов конструкций назначаются как некоторая часть от опасных напряжений в соответствии с нормами, примененными в металлическом судостроении.

Для нормальных и касательных напряжений, имеющих вид зарешечки устойчивости формы конструкции, опасными считаются критические величины, равные теоретическим энегородным напряжениям. Особенности расчета пластмассовых надстроек и легких переборок обусловлены, кроме специфики материалов, особенностями условий работы в составе судового корпуса. Напряжение от общего изгиба в надстройке, установленной на металлический корпус, называемое от ее размеров весьма значительным. Это позволяет определять размеры связей из условия местной прочности или назначать их по соображениям конструктивного и технологического характера. Расчет соподчиненных элементов надстроек в соединении надстроек с палубой металлического корпуса на действие нагрузок от общего изгибавиду наложены последних также может не проводиться, что было подтверждено экспериментально.

Поскольку величина напряжений от общего изгиба в пластмассовых надстройках, устанавливаемых на металлические корпуса, достаточно мала ( $\sigma_{max} < 0,3 \sigma_{sp}$ ), расчет напряжений в районе винтов и окончаний надстроек (и их подкреплений) при общем изгибе можно не производить. В связи с крупным характером разрушений стеклопластиков это обстоятельство имеет весьма существенное значение, так как надстройки в процессе эксплуатации испытывают циклические нагрузки.

## § 22. Общая прочность

Теоретическое исследование по расчету металлических надстроек, начатые в СССР П. Ф. Павловичем [77], а затем Ю. А. Шиманским [108], [109], получили в настоящее время дальнейшее развитие в работах Н. Л. Сиверса [94], Г. В. Бойкова и Г. И. Таубина [14], [15]. Подробный анализ существующих методов расчета надстроек дан в опубликованной в 1966 г. книге Н. Л. Сиверса «Расчет и конструирование судовых надстроек». В этой работе также сделана попытка решить задачу о напряжениях состояния пластмассовых надстроек, установленных на металлический корпус.

Исследование деформаций пластмассовых надстроек ведется на базе решения плоской задачи теории упругости ортотропных тел.

Численные примеры позволяют судить об особенностях работы прерывистых связей, выполненных из стеклопластиков. Эти особенности обусловлены спецификой материала: существенно более высоким модулем нормальной упругости по сравнению со сталью и сравнительно малым (порядка 0,1) отношением модуля сдвига к модулю нормальной упругости. Применение строгого теоретического решения для расчета надстроек

требует весьма громоздких вычислений, что усложняет его практическое использование.

Кроме того, даже этим строгим решением невозможно учесть многообразие факторов, оказывающих влияние на работу надстройки. Поэтому для решения задачи об изгибе пластмассовой надстройки, устанавливаемой на металлическом корпусе, используется метод, основанный на приближенной теории Ю. А. Шиманского [109]. Для сравнительной оценки полученных результатов воспользуемся данными приведенного в § 13 книги [109] примера.

Общие положения этой теории при замене материала надстройки сводятся к следующему. Связи эквивалентного бруса, выполненные из других материалов, в расчете заменяются эквивалентными им стальными связями.

При условии равенства деформации в конструкциях, выполненных из разных материалов, в соответствии с законом Гука

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{E_c} \sigma_c,$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_c$  — нормальные напряжения, соответственно в заменяемой связи и в стальной;

$E_1$  и  $E_c$  — соответствующие модули упругости.

Этот метод приведение к однородности материала применим только при соблюдении условия совместной работы корпуса и надстройки. Определены условия совместной работы корпуса и надстройки. Напряжение в стяже надстройки находится в соответствии с [94] по выражению

$$\sigma_s = \frac{4m}{l_n} (\epsilon_1 + \epsilon_2) \sum_{1,2} \frac{1}{\pi c} \left[ \operatorname{ch} \sigma_s y - \left( \frac{\sigma_{1s}}{\sigma_{2s}} + \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} - \frac{1}{\Phi_{1s} \operatorname{ch} \sigma_s} \right) + \right. \\ \left. \times \operatorname{sh} \sigma_s y + \frac{y - e_2}{e_1 - e_2} \right] \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad (109)$$

Напряжение в арматуре

$$\sigma'_s = \frac{4m}{l_n} (\epsilon_1 + \epsilon_2) \sum_{1,2} \frac{1}{\pi c} \times \\ \times \frac{2 \left[ 1 + \frac{y - e_2}{e_1 - e_2} \operatorname{ch} \sigma_s \right]}{4 \sigma_{1s} \operatorname{sh} \sigma_s} \operatorname{ch} \sigma_s y \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad (110)$$

где  $m$  — изгибающий момент, воспринимаемый надстройкой;  $l_n$  — момент инерции поперечного сечения надстройки;  $e_1$ ,  $e_2$  — отстояние палубы корпуса от НО и центра тяжести надстройки от палубы корпуса соответственно;  $l$  — длина надстройки.

$$\tau_n = \frac{\sigma_s}{l} \sqrt{\frac{2}{1-\mu}}; \quad \Phi_{1s} = \frac{1}{\operatorname{ch} \sigma_s}; \quad \Phi_{2s} = \frac{1}{\operatorname{sh} \sigma_s}; \quad l_n = \sigma_s \frac{\delta}{2}.$$

Внешний изгибающий момент, действующий в данном сечении судна,

$$M_s = [\mathfrak{M}_n - Q_s(\epsilon_1 + \epsilon_2)] \frac{l_n}{l_n - l_{0s}}, \quad \text{где } \gamma = \frac{E_n}{E_n}, \quad (111)$$

а  $Q_s$  определяется по формуле

$$Q_s = \frac{m_0(\theta_1 + \theta_2)}{l_n - l_{0s}} \cdot F \frac{1 - \frac{k}{k_1} \cdot \frac{1}{\operatorname{ch} \sigma_1^2}}{1 - \frac{F(\theta_1 - \theta_2)^2}{l_n \gamma} - \frac{r_1 r_2 F}{2 k_1 \beta_{1s}}}, \quad (112)$$

где

$$\theta = \sqrt{\frac{k}{E_n f_1} \left[ 1 + \frac{f_1 \gamma}{F_n} + \frac{f_1(\theta_1 + \theta_2)^2}{l_n - l_{0s}} \right]},$$

$$k_1 = \frac{\theta_1 \theta_2}{\phi \left( 1 - \frac{3c f_1}{2 f_k} \right)^2}$$

$$k_2 = 2 \pi G_n \frac{(l_{\max, n} + l_{\min, n})}{l_n \theta} k_m;$$

$$k_{sp} = f \left( \frac{\theta_1}{l} \right); \quad c = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}; \quad \beta = f \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{c} \right);$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}; \quad r_1 = 2,53 \frac{1}{\operatorname{th} 2,53 \frac{h_n}{l}}$$

$$z = \frac{1}{\operatorname{ch} 2,53 \frac{h_n}{l}}; \quad \lambda_2 = 1;$$

$$\lambda = 1 - \frac{\lambda_2^2}{1 + \frac{r_1}{r_2} \lambda_2}; \quad \lambda_1 = 1 - \frac{\lambda_2^2}{1 + \frac{r_2}{r_1} \lambda_2}.$$

Дальнейший расчет моментов ведем в табличной форме (табл. 28) по исходным данным вариантов, приведенных в табл. 27.

Таблица 27

Исходные данные для определения напряжений в краевые надстройки

Вариант судна	$F_{\text{н}} / \text{м}^2$	$\sigma_0$	$\frac{\sigma_{\text{нап}}}{\sigma_0 - \sigma_1}$
I	14 800	22,5	0,129
II	27 000	27,0	0,114
III	40 000	33,0	0,101

Примечание. Во всех случаях изгиба надстройки 2,8-метровые листы надстроек  $t_1 = t_2 = 0,5$  мм,  $t_{\text{н}} = 300$  мм,  $t_0 = 11,8$ .

Определение изгибающий момент, воспринимаемый надстройкой, можно перейти к определению напряжений, возникающих в стекне и палубе надстройки.

Численные значения максимальных напряжений приведены в табл. 29. Из этой таблицы видно, что степень участия в общем изгибе пластмассовых надстроек, установленных на металлическом корпусе, не зависит от их размеров и, следовательно, подразделение пластмассовых надстроек на легкие и прочные (короткие и длинные) теряет свой смысл.

На основании выложенного:

$$\tau_1 = \frac{F_1}{E_0}; \quad f_1 = \tau_1 f_0; \quad f_2 = \tau_2 f_0; \quad i_1 = \tau_1 i_0,$$

где  $f_1$  — приведенная площадь полусечения надстройки;

$i_1$  — приведенная толщина стекни надстройки;

$i_2$  — приведенный момент инерции полуплощади сечения надстройки;

$f_2$  — площадь сечения надстройки из стали.

Тогда, используя зависимости [109], получим выражения для определения напряжений на уровне центра тяжести сечения надстройка, предполагая вполне участие ее в изгибе корпуса.

Для стальной надстройки

$$\tau_2 = \frac{\pi (i_1 - i_2)}{F + f_0 (I - i)} \quad (114)$$

Для эквивалентной

$$\tau_0' = \frac{\pi (i_1 - i_2)}{F + f_0 (I - i_0)} \quad (115)$$

Действительное напряжение в сечении надстройки на уровне центра тяжести  $\tau_0'$ :

Таблица 28

Определение момента воспринимаемого надстройкой

Вариант	$t_{\text{н}}$	$t_1$	$t_2$	$\frac{t_1 + t_2}{t_{\text{н}}}$	$F = f_1 F_0$	$\frac{I_1}{I}$	$K_{\text{нр}} = f_0 F_0$	$\frac{I_1}{I}$	
								1	2
I	0,8	3,3	0,77	0,36	0,709	0,363	0,79	14,5	
	1,3	4,6	0,56	0,233	0,736	0,346	0,94	14,5	
	1,8	6,03	0,56	1,161	0,750	0,250	1,10	14,5	
	1,8	6,03	0,55	0,163	0,750	0,300	100	14,5	
II	2,3	7,44	0,392	1,127	0,760	0,224	1,34	14,5	
	2,8	9,00	0,356	0,104	0,760	0,193	1,31	14,5	
III	2,8	9,00	0,358	0,104	0,760	0,228	1,19	14,5	
	3,3	11,0	0,335	0,088	0,760	0,183	1,31	14,5	
	3,8	11,5	0,326	0,076	0,765	0,188	1,45	14,5	

Продолжение

Вариант	$t_{\text{н}}$	$F_{\text{н}} / \text{м}^2$	$t_1$	$t_2$	$\frac{I_1}{I}$	$\frac{I_1}{I}$	$K_{\text{нр}} = f_0 F_0$	$\frac{I_1}{I}$	
								1	2
I	1180	0,79	1160	2,22	1,77	2980	9,5	34,1	
	1135	0,58	1110	2,18	2,84	4440	9,5	34,1	
	1120	0,49	1090	2,13	3,84	4700	9,5	34,1	
	1120	0,465	1090	2,10	3,78	4700	14,4	38,6	
II	1130	0,398	1060	2,08	4,80	6360	14,4	38,6	
	1110	0,374	1030	2,08	5,82	6870	14,4	38,6	
III	1110	0,314	1070	2,04	3,72	6920	18,0	43,6	
	1110	0,316	1070	2,04	6,74	6920	18,0	43,6	
	1050	0,305	1010	2,01	7,65	7720	18,0	43,6	

Заряд	шаг, м	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$		$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_0$		$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{00}$		$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{000}$	
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
I	35	16	20	31	29	23	24	26	26
I	4,44	1180	1480	1,01	8,49	66	4,58	0,54	
I	13,44	1180	1480	1,51	7,99	66	4,30	0,54	
I	23,37	1180	1480	1,60	7,90	66	4,26	0,54	
II	21,92	1490	27080	1,82	12,58	76	3,73	0,26	
II	66,76	1490	27080	2,46	11,94	76	3,58	0,26	
II	105,1	1490	27080	2,65	11,76	76	3,48	0,26	
III	150,0	1490	40080	2,97	11,03	86	3,00	0,20	
III	422,0	1490	40080	3,03	14,97	86	2,95	0,20	
III	1050	1490	40080	3,36	14,64	86	2,93	0,20	

Нормальные напряжения в среднем сечении надстройки будут:

для стальной

$$\sigma_1 = \frac{M_x}{I} \epsilon_1 - \frac{\sigma_0 J \kappa_x}{F} + \frac{m x}{I} \epsilon_2, \quad (116)$$

для эквивалентной

$$\sigma'_1 = \frac{M'_x}{I} \epsilon_1 - \frac{\sigma'_0 J \kappa'_x}{F} + \frac{m' x}{J} \epsilon_2, \quad (117)$$

Напряжение у нижней кромки надстройки

$$\sigma_1^U = \sigma'_1 - \frac{m' x}{J} \epsilon_2. \quad (118)$$

Действительное

$$\sigma_N^{II} := \sigma'_1 \delta. \quad (119)$$

Напряжение у верхней кромки стенок надстройки

$$\sigma_N^{III} := -\sigma'_1 \delta. \quad (120)$$

Напряжение посередине палубы надстройки

$$\sigma_N^{IV} = -\sigma'_1 \delta. \quad (121)$$

Касательное напряжение в районе примыкания концов стеков надстроек к палубе  $\tau = \frac{\sigma_0}{t_0}$ , где  $t_0$  — действительная толщина стены надстройки.

В табл. 30 сопоставлены напряжения в стальной и пластмассовой надстройках (для стального заряда  $h=2,5$  м,  $L=21=10$  м,  $B=4$  м,  $t_0=5$  мм,  $\sigma_0=1440$  кг/см<sup>2</sup>; для стеклопластика принято  $\sigma_{00}=300$  кг/см<sup>2</sup>). Если предположить, что при изгибе пластмассовой надстройки в составе металлического корпуса верна гипотеза плоских сечений, то напряжения в нижней кромке будут разны (~160 кг/см<sup>2</sup> в надстройке и ~260 кг/см<sup>2</sup> в палубе надстройки). Учитывая малость этих величин, можно сделать заключение о возможности использования в первом приближении такого метода расчета для пластмассовых надстроек, поскольку это дает ошибку в безопасную сторону.

При установке надстроек на корпус из пластмасс, видимо, сохраняются все положения и методы расчета, принятые в судостроении с учетом специфики этих материалов.

## § 23. Местная прочность

Нагрузки при расчете местной прочности надстроек возникают в соответствии с действующими нормами в металлическом судостроении или же определяются из условия равнопрочности пластмассовой и замененной конструкции.

Расчет палубы из стеклопластиковых труб включает производится с учетом анизотропии упругих и прочностных свойств, зависящей от типа армирующего материала и структуры армирования. Практические рекомендации по расчету палуб и балок из применяемых в судостроении анизотропных стеклопластиков приводятся в работе [96].

Особый интерес представляют вопросы, связанные с оценкой несущей способности соединений деталей крепления насыщения с переборками, палубами и т. п. Эти соединения выполняются, как правило, с применением клеев.

Многообразие конструктивных форм креплений деталей насыщения к условиям их нагружения обуславливает невозможность однозначного решения вопроса о напряженном состоянии клеевого шва в таких соединениях. Поэтому, чтобы представить напряженное состояние клеевого шва в любой его точке, в первом приближении определялись напряжения в клеевом шве от каждой из нагрузок в отдельности и затем суммированы. Характер приложения этих нагрузок и конструкция соединенных элементов определяют вид нагрузки клея, т. е. тип клеевого соединения. Таким образом, под типом клеевого соединения понимается не только вид соединяемых элементов, но и назначение этого соединения и способ приложения нагрузки.

Таблица 29

действующих в среднем сечении надстройки

	$\frac{F}{A}$	$\frac{M}{I_{xx}}$	$\frac{M}{I_{yy}}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{M}{I_{yy}}$									
	$\frac{F}{A}$	$\frac{M}{I_{xx}}$	$\frac{M}{I_{yy}}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{M}{I_{yy}}$									
	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
I														
1.0	0.00	0.75	1.31	0.00	1.86	2.37	2.86	3.12	3.17	2.44				
1.2	0.18	2.14	3.21	0.18	3.18	4.37	5.27	5.79	5.95	4.98	3.36			
1.3	0.03	0.48	1.12	0.30	0.95	1.11	2.00	3.34	3.41	2.09	2.09			
1.5	0.00	0.24	0.79	0.00	2.00	2.09	3.49	3.99	4.00	2.00	2.00			
1.8	0.00	0.24	1.05	0.31	0.68	3.73	3.95	6.17	7.17	3.27	3.27			
2.0	0.00	1.04	1.39	1.84	2.08	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00			
II														
2.0	0.00	0.29	1.34	0.27	0.54	0.57	3.79	4.19	4.19	2.00	2.00			
2.8	0.00	0.29	1.33	0.35	0.54	2.68	3.11	3.94	4.04	2.00	2.00			
3.0	0.07	0.70	1.47	0.29	2.44	0.15	4.05	4.16	4.16	2.22	2.22			
2.8	0.00	0.29	1.33	0.35	0.54	2.68	3.11	3.94	4.04	2.00	2.00			
2.8	0.00	0.29	1.33	0.35	0.54	2.68	3.11	3.94	4.04	2.00	2.00			
III														
3.0	0.00	0.19	1.02	0.19	0.58	0.39	3.27	3.10	3.10	2.00	2.00			
2.8	0.00	0.32	1.17	0.47	1.10	1.49	3.07	3.18	3.18	2.00	2.00			
2.0	0.00	0.98	2.01	0.36	0.30	3.27	5.75	6.10	7.10	3.26	3.26			

Таблица 29

Сравнение напряжений ( $M/\text{см}^2$ ) в стальной и пластмассовой надстройках при общем изгибе корпуса судна.

Напряжение	Стальная надстройка	Пластмассовая надстройка
В листовой кромке стены	1300	140
В первом якорном санки	550	80
Посредине палубы надстройки	540	60
Наибольшие касательные	1140	150

На основе проведенного анализа представилась возможность многообразия kleевых соединений деталей настиления спектра, исходя из места расположения настиления, к двум условиям конструктивных схемам (рис. 74). Для прочности kleевого шва, крепящего детали настиления к переборке (рис. 74, а), существенное значение имеют следующие нагрузки:

— потогенная перерезывающая нагрузка  $Q$ , являющаяся проекцией сил от антенных нагрузок  $P$  на ось, параллельную плоскости переборки;

— потогенный изгибающий момент  $M$ , наличия которого определяется как конструкционной креплением (арболетом), так и величиной нагрузки  $P$ .

Для прочности клеевого шва, краищего детали насыщения к подводному (рис. 74, б), существенное значение будет иметь нормальная нагрузка, действующая в плоскости, перпендикулярной плоскости склейки.

Нагрузки, действующие на клеевой шов, по происхождению можно подразделить на две группы. К первой относятся внешние нагрузки  $P$ , т. е. нагрузки от веса насыщения и инерционных сил (в том числе от сил, возникающих в результате набора). Они почти полностью накрывают сумму всех внешних нагрузок, действующих за клееное соединение деталей насыщения с корпусом и стремящихся оторвать насыщение от переборки (палубы). Однако в клеевом шве могут существовать нагрузки и другого происхождения. Нагрузки второй группы

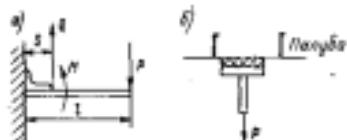


Рис. 74. Схемы крепления деталей насыщений: а - к переборке; б - к палубе.

сammenения с корпусом и стремящимся оторвать насыщение от переборки (палубы). Однако в клеевом шве могут существовать нагрузки и другого происхождения. Нагрузки второй группы

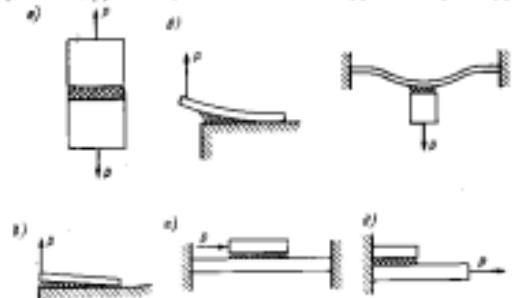


Рис. 75. Типы клеевых соединений: а -стыковые; б - гибкий лист изгибающийся от места крепления; в - гибкий лист изгибающийся от места крепления; г - соединение с винцами; д - усиливющие насыпи.

возникают в клеевом шве в результате деформации переборки или палубы.

Рассматривая конструкции крепления насыщений и схемы приложения нагрузок к клеевому шву, можно условно выделить пять основных типов клеевых соединений (рис. 75).

Определив напряжение в клеевом шве для каждого из вышеописанных типов соединений, можно получить исходную способность соединений в реальных конструкциях.

«Стыковое соединение» может иметь место в случае, если изгибая жесткость проектируемого элемента и жесткость основания (палубы, например) весьма велики. На условность оценки исходящей способности таких соединений по средним напряжениям было указано в § 14.

Для соединения типа «гибкий лист изгибающийся от места крепления» в качестве расчетных схем в зависимости от места приложения нагрузки  $P$ , длины клеевого шва  $l$  и



Рис. 76. Расчетные схемы: а - свободно опирается базой; б - жестко заделанная балка; в - жестко заделанная балка с учетом зазора.

степени заделки может быть принята одна из изображенных на рис. 76 схем за упрощенное основание.

Упрощенным основанием является клеевой слой. При этом максимальные напряжения, определяющие исходную способность соединений, находятся за выражением:

применительно к схеме, приведенной на рис. 76, а и б,

$$\sigma_{\text{ср}}^{\max} = \frac{2P_0}{b} e^{-\alpha x} (xI + 1); \quad (122)$$

применительно к схеме, приведенной на рис. 76, в

$$\sigma_{\text{ср}}^{\max} = \frac{P_0}{2b} e^{-\alpha x} \left( xI + \frac{1}{2} \right), \quad (123)$$

где  $b$  — ширина соединения,  $x$

$$x = \sqrt{\frac{k}{\gamma EI}}.$$

Очевидно, что при конечных размерах  $I$  ошибка будет допущена в безызбышную сторону.

Для соединения типа «жесткий лист неравномерно отрывается от жесткого основания» в качестве расчетной схемы принимается балка конечной длины, лежащая на сплошном упругом основании в загруженном сосредоточенным моментом, приложенным к середине пролета. В этом случае распределение нормальных напряжений по длине клеевого шва выражается следующим образом:

$$\tau_x = 2Mx^2 \left[ b_1 v_1(x_0) + b_2 v_2(x_0) + v_3 \left( x - \frac{I_1}{2} \right) \right], \quad (124)$$

где  $v_1, v_2, v_3, v_4$  — функции Пузыревского,

$$b_1 = \frac{\nu_3 \left( x - \frac{I_1}{2} \right) v_2(I_1 x) + \nu_2 \left( x - \frac{I_1}{2} \right) v_3(I_1 x)}{\nu_2'(I_1 x) - \nu_1(I_1 x) - \nu_3(I_1 x)};$$

$$b_2 = \frac{\nu_4 \left( x - \frac{I_1}{2} \right) v_1(I_1 x) - \nu_3 \left( x - \frac{I_1}{2} \right) v_2(I_1 x)}{\nu_1(I_1 x) v_3(I_1 x) - \nu_2'(I_1 x)};$$

$I_1$  — длина клеевого шва.

Максимальные напряжения, определяющие несущую способность клеевых соединений, определяются из выражения

$$\tau_{\max} = 2Mx^2 \left[ b_1 v_1(I_1 x) + b_2 v_2(I_1 x) + v_3 \left( x - \frac{I_1}{2} \right) \right]. \quad (125)$$

В случае приложения момента в центре пластин выражение для определения  $\tau_{\max}$  будет иметь вид

$$\tau_{\max} = \frac{GM\bar{E}_K}{4w^2} \frac{[v_1(a) - v_2(a)]}{[3 - v_1(a) - 2v_2(a)]}, \quad (126)$$

где  $v_1(a), v_2(a), v_3(a), \bar{E}_K$  — табулированные функции для балок конечной длины, лежащих на сплошном упругом основании.

Работа клеевых соединений в условиях сдвига, как было уже ранее отмечено, является наиболее изученной. Для решения задачи о распределении напряжений в клеевом шве «соединений с накладками» могут быть использованы выражения, приведенные в § 12.

Распределение напряжений в клеевом шве соединения типа «усиливающих накладки» может быть определено выражением

$$\tau_x(x) = \frac{F}{b} \frac{1}{1 + \gamma} x \frac{dv_0(x)}{dx} \Gamma^*, \quad (127)$$

где

$$\beta = \frac{b_2}{b_1}; \quad \gamma = \frac{E_K}{E_L},$$

$b$  — ширина накладки;

$I'$  — половина длины накладки;

$b_1$  — толщина накладки;

$b_2$  — толщина листа переборки;

$E_K$  — модуль нормальной упругости накладки;

$E_L$  — модуль нормальной упругости листа переборки;

$$\Gamma^* = \sqrt{\frac{(b_2 E_K + b_1 E_L) G_K}{b_2 b_1 E_K E_L}};$$

$G_K$  — модуль сдвига клея;

$b$  — толщина клеевого шва.

Если накладка и переборка выполнены из одинакового материала ( $E_K = E_L$ ) и толщины их разны ( $b_2 \neq b_1$ ), максимальные касательные напряжения могут быть определены по формуле

$$\tau_{\max} = \frac{P}{2b} \sigma \operatorname{th} I'. \quad (128)$$

В случае действия статических нагрузок оценка несущей способности клеевых соединений сводится к определению максимальных напряжений по вышеприведенным формулам, которые сравниваются с допустимыми, определяемыми по экспериментальным данным.

Оценка несущей способности соединений при действии вибрационных нагрузок сводится к определению напряжений в клеевом шве и тем самым установлению возможного числа циклов нагружения данного соединения на основании имеющихся диаграмм выносливости (усталостных кривых), построенных по результатам испытаний соединений при различных напряжениях (или нагрузках). При этом нужно отметить, что усталостные кривые для клеевых соединений, как и для большинства пластин, не обладают асимптотой, хотя по мере понижения амплитуды напряжений она становится все более пологой.

Поэтому для клеевых соединений следует принимать условный предел усталости — наибольшие напряжения (амплитуды напряжений), которые выдерживают соединения без усталостного разрушения в течение заданного числа циклов.

Известно, что у таких пластических материалов, какими являются отвержденные клеевые слои, наблюдается прямая пропорциональная зависимость между напряжениями и деформациями при определенной скорости деформирования, величина которой может быть определена только экспериментально. Вполне достоверно, что при небольших напряжениях, далее

от предела статической прочности, эта пропорциональность соблюдается из-за влияния от скорости нагружения. При действиях избирательных нагрузок разрушающие напряжения по своей абсолютной величине значительно меньше статических разрушающих нагрузок, поэтому в указанных пределах зависимость деформаций от напряжений будет линейной или очень близкой к ней. В пределах таких напряжений концепция модулей упругости kleевого слоя, которыми оперируют при составлении уравнений деформации для всех типов kleевых соединений, имеет вполне определенный физический смысл.

Как было указано ранее, определение величин  $E_k$ ,  $G_k$ ,  $\delta_k$  представляет значительные затруднения как виду возможного изменения свойств клея в соединении и зависимости упругих характеристик от скорости нагружения, так и определенной сложности проведения замеров толщины kleевого слоя. Для определения численных значений этих величин, например, применительно к соединению типа «тонкий лист вершином» отрывается от жесткого основания» может быть предложен следующий порядок решения. Несущая способность kleевого шва зависит в этом случае от параметра  $a$ , равного

$$a = \sqrt{\frac{3E_g}{2G_x\delta_x^2}}.$$

Если известны разрушающие нагрузки для двух образцов, отличающихся друг от друга толщиной отрываемого листа, то, поскольку  $a_{max}$  при разрушении, очевидно, является постоянной величиной, зависимость, применяемая к каждому образцу, например [122] или [123], дает возможность получить два уравнения с двумя неизвестными, которые достаточно просто могут быть решены методом последовательных приближений.

## Глава VII

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

#### § 24. Составление вопроса

В последние два десятилетия все увеличивается удельный вес многослойных пластин в оболочках в общем объеме строительных конструкций. Это объясняется тем, что за счет разнесения несущих слоев такие конструкции приобретают при малом весе высокие характеристики прочности и жесткости. Кроме того, комбинируя определенным образом материалы заполнителя и несущих слоев, можно добиться хороших вибростойкости, звукоизоляции и других требуемых характеристик.

Идея использования трехслойной панели или оболочки с разнесенными за счет заполнителя несущими слоями аналогична идею применения двухтавровой балки, причем в оболочке роль полок выполняют несущие слои, а роль стекки — заполнитель. Как известно, впервые трехслойные конструкции были предложены в 1927 г. Однако широкого применения они не нашли, так как полученные от их применения выгоды не компенсировали высокую стоимость изготовления. Вследствие этого такие конструкции начали применяться лишь в авиастроении, где проблема высокой прочности при малом весе занимает ведущее место. В 40-х годах начали появляться первые самолеты с трехслойными конструктивными элементами. В это же время начинается разработка теории расчета таких конструкций. В 1943 г. появляется работа [75], в которой калюмена одна из основных новых используемых газотехнологий прикладной теории трехслойных оболочек в пластин. А в 1946 г. опубликована работа А. Л. Рабиновича, посвященная теории расчета на устойчивость обшивки с заполнителем. В период 1946—1951 гг. опубликованы работы Райсбера, Прускова, Штейна и Майерса, Хоффа, в которых изложены теории жесткого и устойчивости трехслойных пластин.

К этому времени работы по исследованию трехслойных конструкций создали определенное направление в строительной механике зданий и оболочек. Появившиеся целые группы исследо-

патель, занимавшихся этими вопросами. Первой и наиболее крупной явилась группа ученых в Новосибирске: А. Я. Александров, Л. М. Куршин, Л. Э. Брюхов, Э. И. Григорьев, П. П. Чулков и др., опубликовавшая ряд работ, посвященных прикладным методам расчета трехслойных пластин и оболочек и экспериментальным исследованиям прочности трехслойных панелей и оболочек [3], [4], [16], [28], [29], [30], [67], [68].

Группа ученых в Казани под руководством Х. М. Мунтари занимается в настоящее время преимущественно вопросами теории трехслойных оболочек. Этой группой проделана большая работа по обоснованию различных гипотез, принесенных при расчете трехслойных оболочек [73], [74], и строгих зависимостей теории трехслойных оболочек.

Значительный вклад в теорию расчета трехслойных оболочек внесли В. И. Королев [61], [62], В. Ф. Караваев [50], [51], Е. С. Голубев [27], В. П. Карюжинский [52], Б. Я. Розенфельд [90], [91], Г. К. Абрамки [2], В. Г. Попов [69].

Серьезные работы по методам расчета, теории и практике применения в строительстве опубликовала группа ученых ЦНИИС под руководством проф. А. Б. Губенко [31], [32], [33].

Большинство работ, изданных до 1959 г., посвящено теории устойчивости трехслойных панелей симметричного строения при сжатии и изгибе. Это объясняется тем, что наибольший эффект трехслойные панели дают именно при работе на эти виды нагрузки, а в авиационной технике того времени применялись в основном симметричные трехслойные конструкции (крыло, фюзеляж). В этих работах получены выражения для определения критической силы, установлены оптимальные зависимости параметров несущих слоев и заполнителя от нагрузки, исследованы некоторые типы заполнителей.

В связи с широким внедрением трехслойных конструкций в практику самолетостроения переходом на их массовое производство возникла необходимость выяснить влияние начальных ассиметрий на прочность трехслойных конструкций для обоснования технологических условий на изготовление таких конструкций. Этим вопросам посвящены работы А. Я. Александрова, В. П. Карюжинского [3], [6], [62].

Резкое увеличение скорости летательных аппаратов поставило на повестку дня вопрос о тепловой защите конструкций от действия аэродинамического нагрева. Это привело к созданию несимметричных по строению трехслойных оболочек.

При рассмотрении таких конструкций возникла проблема определения температурных деформаций и учета несимметричности строения оболочек. Расчету несимметричных трехслойных оболочек посвящены работы В. П. Карюжинского [52], Л. М. Куршина [67], Б. Г. Газизова [25], Г. К. Абрамки [2], Э. И. Григорьева [36].

В последнее время трехслойные конструкции все шире применяются в других отраслях техники. Это потребовало создания новых теорий расчета, так как схемы нагружения объектов стали более разнообразными.

Одной из особенностей нагружения трехслойных конструкций является нагружение на один несущий слой, в то время как второй слой включается в работу через посредство заполнителя. Представляет интерес исследование такой схемы нагружения при действии сосредоточенных сил (штокбалки, отдельно стоящие устройства в верхней полубашне падающей башни).

Как показывают результаты экспериментальных исследований элементов трехслойных панелей, предложенные различными авторами расчетные схемы работы трехслойных панелей в целом и особенно элементов панелей (в частности, сотового заполнителя) не удовлетворяют требованиям точности расчета. Получаемые расчетом значения параметров панели и заполнителя далеко не совпадают с параметрами, определенными экспериментально. Совершенно неудовлетворительно определяются модули единого заполнителя, а методы расчета модуля скатия заполнителя нет. Это затрудняет рациональное проектирование конструкции, не позволяет правильно задавать требуемые размеры заполнителя. Необходимо уточнить механику работы сотового заполнителя, что позволит создать надежные расчетные методы определения параметров заполнителя.

В настоящее время недостаточно внимания уделяется созданию обоснованных тезисных условий на приемку трехслойных конструкций, обоснованию технологических допусков, разработке тезисных условий на эксплуатацию и ремонт трехслойных конструкций. Отсутствуют систематизированные методики определения оптимальных параметров трехслойных конструкций с сотовым заполнителем. Крайне мало имеется работ, посвященных расчету динамических свойств трехслойных панелей.

## § 25. Элементы теории расчета трехслойных прямоугольных пластин с легким промежуточным заполнителем

В настоящем параграфе рассмотрены задачи расчета трехслойных прямоугольных пластин при нагружении некоторыми наиболее характерными нагрузками. Опорение пластин на контире предполагается шарнирным.

Исследования, проведенные в работе [15], показали, что требуется в инженерной практике точность (определение прогиба с точностью до 5–10% по сравнению с экспериментальными значениями) в случае расчета трехслойных пластин с наиболее часто применяемыми параметрами заполнителей и несущих слоев может быть получена лишь при использовании полной

системы уравнений равновесия пластин. Эти расчеты достаточно трудоемки, и их рационально производить с помощью ЭВМ. Предлагаемые в ряде работ зависимости для определения прогибов пластин, основанные на преобразовании перемещениями несущих слоев по касательной к средней поверхности пластинки, дают заниженные до 30% значения прогиба. Однако эти выражения позволяют достаточно быстро и без применения сложных вычислительных средств произвести сравнительную качественную оценку того или иного варианта конструкции. На основании сделанного выбора варианта конструкции рекомендуется производить, используя приближенные формулы для определения параметров деформации пластины, а расчет выбранной конструкции — по точным формулам, же ЭВМ.

Анализ расчетов, выполненных для ряда вариантов пластин с наиболее характерными параметрами несущих слоев и заполнителя, показал, что при  $a/b > 3$ , где  $a$  — длина пластины,  $b$  — ширина, пластина находится в условиях цилиндрического изгиба. При этом система уравнений существенно упрощается. Кроме того, при нагружении пластины равномерно распределенной нагрузкой или нагрузкой, распределенной по закону треугольника, сближением слоев по нормали можно пренебречь, т. е. можно принять  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ . Это же допущение можно сделать в случае расчета пластины, нагруженной силой, распределенной по части поверхности пластины, причем в месте приложения нагрузки между несущими слоями заполнитель усилен настолько, что модуль сжатия усиленного участка значительно больше модуля сжатия остальной части заполнителя ( $E_{\text{зап}} \gg E_{\text{2g}}$ ).

При расчете прочности трехслойной пластины следует кроме проверки напряжений в несущих слоях производить проверку напряжений в заполнителе, сравнивая эти напряжения с допускаемыми напряжениями на сдвиг  $\tau_{\text{сп}}$  и сдвиг  $\tau_{\text{мд}}$ . Чем  $\tau_{\text{сп}}$  заполнителя, и проверку единицящих и отрывавших напряжений на границе раздела заполнитель — несущий слой. При расчете kleевых пластин напряжения на границе раздела заполнителя — несущий слой следует сравнивать с допускаемыми напряжениями на сдвиг или неравномерный отрыв.

Уравнения равновесия трехслойной прямоугольной пластины с легким промежуточным заполнителем (в дальнейшем будем называть ее просто пластинкой, кроме специально оговоренных случаев) выводят из уравнений равновесия трехслойной цилиндрической оболочки с легким промежуточным заполнителем, приведенных в работе [55] при  $R = \infty$ . При выходе уравнений приведены следующие гипотезы и допущения:

— несущие слои рассматриваются как некоторые изотропные пластины (металлы), нагруженные системой сил, состоя-

щей из внешней нагрузки, приложенной к данной пластине, и реактивной нагрузки, действующей со стороны прикрепления заполнителя и пропорциональной его деформации;

— заполнитель рассматривается как упругое ортотропное тело;

— деформация несущих слоев описывается на основании гипотезы Кирхгофа-Лиса;

— перемещения в заполнителе по касательной к средней поверхности пластинки считаются изменяющимися по линейному закону, что соответствует гипотезе Нейта. Перемещения в заполнителе по нормали к средней поверхности также считаются линейными. Использование этой гипотезы обеспечивает нет деформаций заполнителя с точностью не менее 5% при  $G_{\text{зап}} \delta_z > 800 \text{ кГ/см}^2$ ;

— толщина заполнителя принимается значительно большей, чем толщина несущих слоев, т. е.  $\delta_z \gg \delta_1, \delta_2$ .

Система уравнений описывает деформированное состояние трехслойной пластины с промежуточным заполнителем, несущие слои которой имеют в общем случае различные геометрические и физические характеристики.

Уравнения равновесия имеют вид

$$\begin{aligned} & \left( a_{11z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + a_{13z} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \sigma_{13y} \right) u_1 + \left( a_{11y} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + a_{13y} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \sigma_{13z} \right) \times \\ & \quad \times u_2 + a_{12z} \frac{\partial u_1}{\partial z \partial y} + a_{12y} \frac{\partial u_2}{\partial z \partial y} + (a_{11z} \tau^2 + a_{13z}) \frac{\partial w_1}{\partial z} + \\ & \quad + (a_{11y} \tau^2 + a_{13y}) \frac{\partial w_2}{\partial z} + x_1 = 0; \\ & \left( a_{11z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + a_{13z} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{11y} \right) u_1 + \left( a_{33z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + a_{33y} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \sigma_{31z} \right) \times \\ & \quad \times u_2 + a_{34z} \frac{\partial u_1}{\partial z \partial y} + a_{34y} \frac{\partial u_2}{\partial z \partial y} + \left( \frac{a_{33z}}{2} \tau^2 + a_{33z} \right) \frac{\partial w_1}{\partial z} + \\ & \quad + (2a_{33z} \tau^2 + a_{33y}) \frac{\partial w_2}{\partial z} + x_2 = 0; \\ & a_{12z} \frac{\partial u_1}{\partial z \partial y} + a_{12y} \frac{\partial u_2}{\partial z \partial y} + \left( a_{33z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + a_{33y} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - a_{11z} \right) v_1 + \\ & + \left( a_{33z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + a_{33y} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{11y} \right) v_2 + (a_{11z} \tau^2 + a_{11y}) \frac{\partial w_1}{\partial y} + \\ & + (a_{11z} \tau^2 + a_{11y}) \frac{\partial w_2}{\partial y} + y_1 = 0; \\ & a_{12z} \frac{\partial v_1}{\partial z \partial y} + a_{12y} \frac{\partial v_2}{\partial z \partial y} + \left( a_{33z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + a_{33y} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{11z} \right) v_1 + \end{aligned} \tag{129}$$

$$+\left(a_{23} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{32} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{13}\right) v_2 + \left(\frac{a_{13}}{2} V^2 + a_{13}\right) \frac{\partial v_1}{\partial y} + \\ + \left(2a_{13}V^2 + a_{13}\right) \frac{\partial v_2}{\partial y} + v_2 = 0; \\ (a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial v_1}{\partial x} + \left(\frac{a_{13}}{2} + a_{23}\right) \frac{\partial v_2}{\partial x} + \left(a_{13}V^2 + a_{13}\right) \times \\ \times \frac{\partial v_3}{\partial y} + \left(\frac{a_{13}}{2} + a_{23}\right) \frac{\partial v_4}{\partial y} + \left(a_{13}V^2 + a_{13}\right) v_1 + \\ + \left(a_{13}V^2 + a_{13}\right) v_2 - a_{13}V^2 - a_{13} = 0; \\ (a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial v_1}{\partial x} + \left(2a_{13}V^2 + a_{13}\right) \frac{\partial v_2}{\partial x} + \left(a_{13}V^2 + a_{13}\right) \times \\ \times \frac{\partial v_3}{\partial y} + \left(2a_{13}V^2 + a_{13}\right) \frac{\partial v_4}{\partial y} + \left(a_{13}V^2 + a_{13}\right) v_1 + \\ + \left(a_{13}V^2 + a_{13}\right) v_2 - a_{13} = 0.$$

#### Система уравнений разно-

$v_1$	$v_2$	$v_3$
$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{13}$	$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_{13}$	$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$
$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{13} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{13}$	$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_{13} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - a_{13}$	$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$
$a_{13} \frac{\partial}{\partial x \partial y}$	$a_{13} \frac{\partial}{\partial x \partial y}$	$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{13}$
$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$	$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$	$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_{13}$
$(a_{13}V^2 - a_{13}) \frac{\partial}{\partial x}$	$\left(\frac{a_{13}}{2} V^2 - a_{13}\right) \frac{\partial}{\partial x}$	$(a_{13}V^2 - a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$
$(a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$(2a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial x}$	$(a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$

Здесь

$$V^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right); \quad V^2 V^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)^2.$$

Для облегчения подготовки к решению задачи на ЭВМ запишем уравнение в виде таблицы (табл. 31).

Коэффициенты  $a_{ij}$  системы уравнений приведены в табл. 32. При расчете коэффициентов  $a_{ij}$  следует оценить значения отношения  $r_x$ ,  $r_y$  и  $r_{xy}$ , вычисляемых по формулам

$$r_x = \frac{3a_{13}b_1}{(1 - \gamma_{13}b_1)E_{13}b_1}; \quad r_y = \frac{3a_{13}b_1}{(1 - \gamma_{13}b_1)E_{13}b_1}; \quad r_{xy} = \frac{3a_{13}b_1}{a_{13}b_1}, \quad (130)$$

Таблица 31

#### матрица трехугольной панели

$v_1$	$v_2$	$v_3$	$w_1$	Составляющие
$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$	$(a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial x}$	$(a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$(a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial x}$	$X_1$
$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$	$\left(\frac{a_{13}}{2} V^2 + a_{13}\right) \frac{\partial}{\partial x}$	$(2a_{13}V^2 - a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$(2a_{13}V^2 - a_{13}) \frac{\partial}{\partial x}$	$X_2$
$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{13}$	$(a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$(a_{13}V^2 - a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$(a_{13}V^2 - a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$Y_3$
$a_{13} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{13} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{13}$	$\left(\frac{a_{13}}{2} V^2 + a_{13}\right) \frac{\partial}{\partial y}$	$(2a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$(2a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$Y_4$
$\left(\frac{a_{13}}{2} V^2 - a_{13}\right) \frac{\partial}{\partial y}$	$(a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$a_{13}V^2 V^2 + a_{13}V^2 - a_{13}$	$a_{13}V^2 V^2 - a_{13}V^2 - a_{13}$	$-Z_1$
$(a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial y}$	$(2a_{13}V^2 + a_{13}) \frac{\partial}{\partial x}$	$a_{13}V^2 V^2 - a_{13}V^2 - a_{13}$	$a_{13}V^2 V^2 + a_{13}V^2 - a_{13}$	$-Z_2$

Таблица 32  
Коэффициенты  $a_{ij}$  системы уравнений равномерного трехслойного изгиба

$a_{111}$	$\frac{E_1 \rho_1}{1 - \nu_1^2} + \frac{E_2 \rho_2}{3(1 - \nu_2^2)}$
$a_{112}$	$\frac{E_1 \rho_1}{2(1 + \nu_2)} + \frac{E_2 \rho_2}{6(1 + \nu_2)}$
$a_{121}$	$\frac{\bar{\rho}_2}{2(1 + \nu_2) \cdot \bar{\rho}_2}$
$a_{122}$	$\frac{E_2 \rho_2}{6(1 - \nu_2^2)}$
$a_{211}$	$\frac{E_2 \rho_2}{12(1 - \nu_2)}$
$a_{212}$	$\frac{E_1 \rho_1}{2(1 - \nu_1)} + \frac{E_2 \rho_2}{6(1 - \nu_2)}$
$a_{221}$	$\frac{E_2 \rho_2}{12(1 - \nu_2)}$
$a_{222}$	$-\frac{E_1 \rho_1 \bar{\rho}_2}{6(1 - \nu_2^2)}$
$a_{311}$	$\frac{E_2}{4} \left( \frac{1 - 3\nu_2}{1 - \nu_2^2} + \frac{1}{1 + \nu_2 \cdot \bar{\rho}_2} \right)$
$a_{312}$	$\frac{E_2 \rho_2 \bar{\rho}_2}{12(1 - \nu_2^2)}$
$a_{321}$	$\frac{\bar{\rho}_2}{4} \left( \frac{1}{1 - \nu_2} + \frac{1}{1 + \nu_2 \cdot \bar{\rho}_2} \right)$
$a_{322}$	$\frac{E_2 \rho_2}{1 - \nu_2^2} + \frac{E_2 \bar{\rho}_2}{3(1 - \nu_2^2)}$
$a_{411}$	$\frac{E_2 \rho_2}{2(1 + \nu_2)} + \frac{E_2 \bar{\rho}_2}{6(1 + \nu_2)}$
$a_{412}$	$\frac{E_2 \rho_2}{2(1 - \nu_2)} + \frac{E_2 \bar{\rho}_2}{6(1 - \nu_2)}$
$a_{421}$	$-\frac{E_2}{4} \left( \frac{1 - 3\nu_2}{1 - \nu_2^2} + \frac{1}{1 + \nu_2 \cdot \bar{\rho}_2} \right)$
$a_{422}$	$-\frac{E_2}{4} \left( \frac{1 - 3\nu_2}{1 - \nu_2^2} - \frac{1}{1 + \nu_2 \cdot \bar{\rho}_2} \right)$

Приложение

$a_{511}$	$\frac{E_2 \rho_2}{1 - \nu_2^2} \frac{\bar{\rho}_2^2}{12} + \left( 3 \frac{\bar{\rho}_2^2}{\bar{\rho}_2^2} - 6 \frac{\bar{\rho}_2}{\bar{\rho}_2} + 4 \right) D_1$
$a_{512}$	$-\frac{E_2 \rho_2}{1 - \nu_2^2} \left( \frac{1 - \nu_2}{6} + \frac{1 + 3\nu_2 \cdot \bar{\rho}_2}{4} \right)$
$a_{521}$	$\frac{E_2}{3(1 - \nu_2^2)}$
$a_{522}$	$-\frac{E_2 \rho_2 \bar{\rho}_2}{1 - \nu_2^2} \frac{\bar{\rho}_2}{24}$
$a_{611}$	$\frac{E_2 \rho_2}{1 - \nu_2^2} \left[ \frac{1 - \nu_2}{12} + \frac{1 - 3\nu_2 \cdot \bar{\rho}_2}{4} - \frac{1 - \nu_2 \cdot \bar{\rho}_2}{4 \cdot \bar{\rho}_2} \right]$
$a_{612}$	$\frac{E_2 \rho_2}{1 - \nu_2^2} \left[ \frac{1 - \nu_2}{12} + \frac{1 - 3\nu_2 \cdot \bar{\rho}_2}{4} - \frac{1 - \nu_2 \cdot \bar{\rho}_2}{4 \cdot \bar{\rho}_2} \right]$
$a_{621}$	$\frac{E_2 \rho_2}{1 - \nu_2^2} \frac{\bar{\rho}_2^2}{12} + \left( 3 \frac{\bar{\rho}_2^2}{\bar{\rho}_2^2} + 6 \frac{\bar{\rho}_2}{\bar{\rho}_2} + 4 \right) D_2$
$a_{622}$	$-\frac{E_2 \rho_2}{1 - \nu_2^2} \left( \frac{1 - \nu_2}{6} + \frac{1 + \nu_2 \cdot \bar{\rho}_2}{4} \right)$

В случае если  $r_s > 0$ ,  $r_p > 0$  и  $r_m > 0$ , некоторые члены в выражении коэффициентов  $a_{ij}$  можно пренебречь.

Проведенные на ЭВМ «Эрал-2» расчеты значительного числа вариантов трехслойных пластин показали, что использование предлагаемых форм записи уравнений и методики решения существенно облегчает программирование задач расчета и позволяет применить стандартную подпрограмму решения систем линейных уравнений в матричной форме. Полученная при этом система эквивалентна одному разрешающему уравнению шестнадцатого порядка. Для решения системы необходимо задать 16 граничных условий по 4 за каждую из сторон пластины в любом порядке.

### § 26. Цилиндрический изгиб трехслойной пластин

В случае цилиндрического изгиба пластины система уравнений, приведенная в табл. 31, приобретает вид системы, представленной в табл. 33, а при допущении о равенстве прогибов несущих слоев по нормали  $w_1 = w_2 = w$  система уравнений (129) преобразуется в систему

$$\begin{aligned} & \left( a_{11} \frac{\partial}{\partial x} - a_{13} \right) u_1 + \left( a_{21} \frac{\partial}{\partial x} + a_{31} \right) u_2 + \left[ (a_{13} + a_{31}) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \right. \\ & \quad \left. + (a_{13} + a_{31}) \right] \frac{\partial w}{\partial x} = -x_1; \\ & \left( a_{12} \frac{\partial}{\partial x} + a_{13} \right) u_1 + \left( a_{22} \frac{\partial}{\partial x} - a_{32} \right) u_2 + \left[ \left( \frac{a_{32}}{2} + 2a_{12} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \right. \\ & \quad \left. + (a_{32} + a_{12}) \right] \frac{\partial w}{\partial x} = -x_2; \\ & - \left[ (a_{111} + a_{311}) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + (a_{111} + a_{311}) \right] \frac{\partial u_1}{\partial x} - \left[ \left( \frac{a_{111}}{2} + 2a_{311} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \right. \\ & \quad \left. + (a_{311} + a_{111}) \right] \frac{\partial u_2}{\partial x} + \left[ (-a_{111} - 2a_{311} - a_{111}) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \right. \\ & \quad \left. + (a_{111} + a_{311} + a_{311} - a_{111}) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] w = -(x_1 + x_2). \quad (131) \end{aligned}$$

В случае возможности сближения опор и соединения несущих слоев диафрагмами абсолютно жесткими в своей плоскости и абсолютно податливыми из своей плоскости, установленными в сечениях  $x=0$  и  $x=l$ , деформации несущих слоев пластины могут быть определены из выражений:

$$\begin{aligned} u_1 &= \sum_n L_{1n} \cos \frac{n\pi x}{l}; \quad u_2 = \sum_n L_{2n} \cos \frac{n\pi x}{l}, \\ w &= \sum_n L_{3n} \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad (132) \end{aligned}$$

где

$$L_{1n} = \frac{u_{1n}}{u_m}; \quad L_{2n} = \frac{u_{2n}}{u_m}; \quad L_{3n} = \frac{u_{3n}}{u_m};$$

$u_m$  — определят системы алгебраических уравнений, полученной из исходной системы дифференциальных уравнений, подстановкой значений  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $w$ , в  $\Omega_m$  — альянты  $k$ -го элемента третьей строки определителя:

$$\begin{aligned} \Omega_m &= \begin{vmatrix} b_{11m} & b_{12m} & b_{13m} \\ b_{21m} & b_{22m} & b_{23m} \\ b_{31m} & b_{32m} & b_{33m} \end{vmatrix}; \quad \Omega_{1m} = q_m \begin{vmatrix} b_{11m} & b_{13m} \\ b_{31m} & b_{33m} \end{vmatrix}; \\ \Omega_{2m} &= q_m \begin{vmatrix} b_{11m} & b_{23m} \\ b_{21m} & b_{33m} \end{vmatrix}; \quad \Omega_{3m} = q_m \begin{vmatrix} b_{11m} & b_{12m} \\ b_{21m} & b_{32m} \end{vmatrix} \quad (133) \\ & \quad (q_m = q_k; \quad m = 1). \end{aligned}$$

Рисунок 13

Система уравнений, разбиваемая промежуточной линией при плавающем крае

$a_i$	$u_i$		$w_i$		Следующий член
	$a_{111}$	$a_{311}$	$a_{111}$	$a_{311}$	
$a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311}$	$\left( a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( 2a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311} \right) \frac{d}{dx}$	$2a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311}$	$-x_1$
$a_{311} \frac{d^2}{dx^2} - a_{111}$	$\left( \frac{a_{311}}{2} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( \frac{a_{311}}{2} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( 2a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$2a_{311} \frac{d^2}{dx^2} - a_{111}$	$-x_1$
$a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311}$	$a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311}$	$a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311}$	$a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311}$	$a_{111} \frac{d^2}{dx^2} + a_{311}$	$-x_1$
$a_{311} \frac{d^2}{dx^2} - a_{111}$	$\left( 2a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( 2a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$a_{311} \frac{d^2}{dx^2} - a_{111}$	$-x_1$
$a_{111} \frac{d^2}{dx^2} - a_{311}$	$\left( a_{111} \frac{d^2}{dx^2} - a_{311} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( a_{111} \frac{d^2}{dx^2} - a_{311} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( 2a_{111} \frac{d^2}{dx^2} - a_{311} \right) \frac{d}{dx}$	$2a_{111} \frac{d^2}{dx^2} - a_{311}$	$-x_1$
$a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111}$	$\left( 2a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( 2a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$\left( a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111} \right) \frac{d}{dx}$	$a_{311} \frac{d^2}{dx^2} + a_{111}$	$-x_1$

Коэффициенты  $b_{lmn}$  имеют вид:

$$\begin{aligned} b_{11m} &= -\left[a_{111}\left(\frac{\pi m}{l_0}\right)^2 + a_{112}\right]; \quad b_{12m} = -\left[a_{111}\left(\frac{\pi m}{l_0}\right)^2 - a_{112}\right]; \\ b_{13m} &= -\left[\left(a_{111} + a_{112}\right)\left(\frac{\pi m}{l_0}\right)^2 + \left(a_{111} + a_{112}\right)\right]\frac{\pi m}{l_0}; \\ b_{21m} &= -\left[a_{111}\left(\frac{\pi m}{l_0}\right)^2 - a_{112}\right]; \quad b_{22m} = -\left[a_{111}\left(\frac{\pi m}{l_0}\right)^2 + a_{112}\right]; \\ b_{23m} &= \left[-\left(\frac{a_{111}}{2} + 2a_{112}\right)\left(\frac{\pi m}{l_0}\right)^2 + \left(a_{111} + a_{112}\right)\right]\frac{\pi m}{l_0}; \\ b_{31m} &= b_{13m}; \quad b_{32m} = b_{23m}; \\ b_{33m} &= \left[\left(-a_{111} + 2a_{112} - a_{113}\right)\left(\frac{\pi m}{l_0}\right)^2 + \right. \\ &\quad \left.- \left(a_{111} + a_{112} - a_{113} - a_{114}\right)\left(\frac{\pi m}{l_0}\right)^2\right]. \end{aligned} \quad (134)$$

Напряжение сдвига в заполнителе на границе с несущими слоями

$$\tau_{xy} = \sum_n \frac{G_{xy}}{z_n} (L_{1n} - L_{2n}) \cos \frac{\pi n x}{l_0}. \quad (135)$$

Изгибающие моменты в несущих слоях

$$M_1 = D_1 \frac{d^2 w}{dx^2}; \quad M_2 = -D_2 \frac{d^2 w}{dx^2}. \quad (136)$$

Перерезывающие силы определяются из выражений

$$Q_1 = D_1 \frac{d^3 w}{dx^3}; \quad Q_2 = -D_2 \frac{d^3 w}{dx^3}. \quad (137)$$

Здесь  $D_{1,2}$  — цилиндрические жесткости несущих слоев, равные

$$D_1 = \frac{E_1 l_0^3}{12(1-\nu_1^2)}; \quad D_2 = \frac{E_2 l_0^3}{12(1-\nu_2^2)}.$$

Изгиб пластинки под действием радиально распределенной нагрузки (рис. 77). Равномерную нагрузку интенсивностью  $q_0$  можно разложить в ряд вида

$$q_0 = \frac{4q_0}{\pi} \sum_{m=1,3,5} \frac{1}{m} \sin \frac{\pi m x}{l_0}. \quad (138)$$

Расчеты показывают, что для определения параметров деформации с точностью до 4—5% достаточно воспользоваться

двумя-тремя членами ряда (138). Изгибающие моменты и перерезывающие силы в несущих слоях, а также напряжение сдвига в заполнителе определяются по формулам (135), (136), (137).

Приближенное значение прогиба пластины может быть найдено из выражения

$$w = -\frac{4q_0}{\pi D_1} \sum_{m=1,3,5} \frac{1}{\frac{m^2}{4} \left( \frac{m^2}{4} + \frac{b_1^2}{l_0^2} - \beta_1^2 \right)} \sin \frac{\pi m x}{l_0} \quad (139)$$

или

$$w = \frac{q_0}{2D_1 \beta_1^2} \left[ \frac{2}{\beta_1^2} + \frac{\operatorname{ch} \beta_1 x - \operatorname{ch} \frac{\pi}{2}}{\operatorname{ch} \beta_1 \frac{\pi}{2}} + \left( \frac{x^2}{4} - x^2 \right) \right], \quad (140)$$

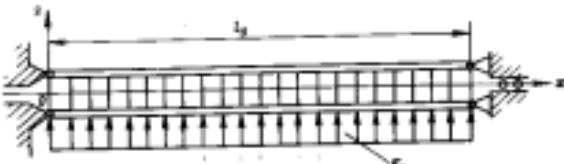


Рис. 77. Схема нагружения трехслойной пластины при радиальном равномерно распределенном загрузке.

где  $D_1$  — цилиндрическая жесткость трехслойной пластины, в целом равная

$$\begin{aligned} D_1 = & \frac{E_1 \beta_1^3}{1-\nu_1^2} \left( \frac{b_1^2}{4l_0^2} + \frac{b_1}{2l_0} + \frac{1}{3} \right) + \frac{E_2 \beta_2^3}{1-\nu_2^2} \left( \frac{b_2^2}{4l_0^2} + \frac{b_2}{2l_0} + \frac{1}{3} \right) + \\ & + \frac{E_3 \beta_3^3}{1-\nu_3^2} \left( \frac{b_3^2}{4l_0^2} + \frac{b_3}{2l_0} \right), \end{aligned} \quad (141)$$

а

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{a_{111} \beta_0 \left( 1 + \frac{b_1}{2l_0} + \frac{b_1^2}{4l_0^2} \right)}{D_1}},$$

изгиб пластины под действием нагрузки, распределенной по закону треугольника (рис. 78). Из работы [109] следует, что нагрузку, распределенную по закону треугольника, можно

представить в виде ряда

$$q_m(x) = \frac{3a_0}{z} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{n} \sin \frac{n\pi x}{l_0}. \quad (142)$$

Перемещения несущих слоев пластины

$$\begin{aligned} u_1 &= \sum_{m=1}^{\infty} L_{1m} \cos \frac{n\pi x}{l_0}; \\ u_2 &= \sum_{m=1}^{\infty} L_{2m} \cos \frac{n\pi x}{l_0}; \\ w &= \sum_{m=1}^{\infty} L_{4m} \sin \frac{n\pi x}{l_0}. \end{aligned} \quad (143)$$

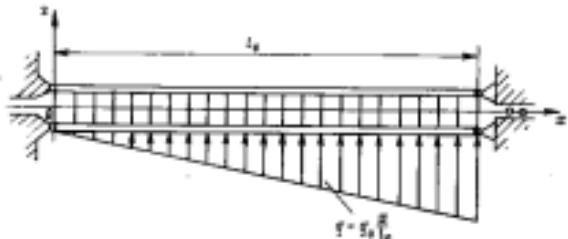


Рис. 78. Схема нагружения трехслойной пластины при изокинетическом изгибе нагрузкой, распределенной по закону треугольника.

где  $L_{1m}$ ,  $L_{2m}$ ,  $L_{4m}$  определяются формулами (132), откуда

$$q_m = \frac{3a_0}{z} \frac{(-1)^{m+1}}{m} \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (144)$$

Напряжения сдвига в заделке на границе с несущими слоями находятся из (135) при  $m=1, 2, 3, \dots$ , а изгибывающие моменты и перерезывающие силы — из (136), (137). Приближенное значение прогиба  $w$  может быть определено из выражения

$$w = \frac{3a_0}{z^2 D_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{\frac{m^2}{a^2} \left( \frac{a^2}{z^2} \frac{m^2}{l_0^2} - \beta_1^2 \right)} \sin \frac{m\pi x}{a}, \quad (145)$$

Для определения деформаций пластины с точностью до 4—5% достаточно воспользоваться 3—5 членами рядов (143) и (144). Для оценки прогиба трехслойной пластины также достаточно использовать 3—5 членов ряда (145).

Изгиб пластины под действием нагрузки, равномерно распределенной по части несущего слоя и перпендикулярной срединной поверхности (рис. 79). При действии распределенной нагрузки, приложенной по части поверхности несущего слоя

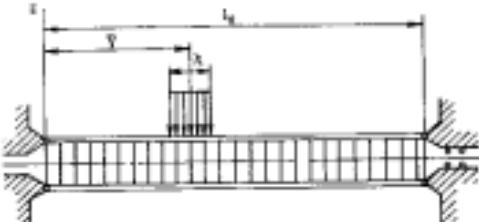


Рис. 79. Схема нагружения трехслойной пластины при изокинетическом изгибе нагрузкой, распределенной по участку поверхности.

длиной  $b_0$  в вертикальной срединной поверхности. Нагрузка может быть представлена в виде ряда

$$q = \frac{4P}{\pi ab} \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{m\pi y}{a} \sin \frac{m\pi x}{l_0} \sin \frac{m\pi z}{b}, \quad (146)$$

где  $y$  — координата середины нагруженного участка.

В случае если в зоне приложения нагрузки установлен подкрепляющий элемент, у которого  $E \gg E_0$ , перемещения несущих слоев пластины могут быть определены из выражений (132) и (133). При этом приближенное значение прогиба пластины

$$w = - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4P}{D_0 ab} \frac{\sin \frac{m\pi y}{a} \sin \frac{m\pi z}{b}}{\left( \frac{m^2}{a^2} \tau^2 - \beta_1^2 \right) \frac{m^2}{b^2}} \sin \frac{m\pi x}{l_0}. \quad (147)$$

В случае когда подкрепляющий элемент отсутствует, при расчете деформаций заменителя необходимо учитывать сближение слоев, вследствие чего следует считать  $w_1 \neq w_2$ .

Тогда перемещения в несущих слоях должны определяться из выражений

$$u_1 = \sum_{n=1}^{\infty} L_{1n} \cos \frac{n\pi x}{l_0}; \quad u_2 = \sum_{n=1}^{\infty} L_{2n} \cos \frac{n\pi x}{l_0}; \\ w_1 = \sum_{n=1}^{\infty} L_{3n} \sin \frac{n\pi x}{l_0}; \quad w_2 = \sum_{n=1}^{\infty} L_{4n} \sin \frac{n\pi x}{l_0}, \quad (148)$$

где

$$L_{1n} = \frac{U_{1n}^*}{U^*}; \quad L_{2n} = \frac{U_{2n}^*}{U^*}; \quad L_{3n} = \frac{U_{3n}^*}{U^*}; \quad L_{4n} = \frac{U_{4n}^*}{U^*};$$

$U^*$  — определитель системы алгебраических уравнений, полученных из системы, приведенной в табл. 33, при подстановке значений  $\alpha_{131}$ ,  $\alpha_{141}$ ; (148), а  $\Omega_{kn}$  —адьюнкта  $k$ -го элемента третьей строки или адьюнкта  $k$ -го элемента четвертой строки определителя при приложении нагрузки к внутреннему слою

$$\Omega_n^* = \begin{vmatrix} b_{13n} & b_{12n} & b_{14n} & b_{11n} \\ b_{23n} & b_{22n} & b_{24n} & b_{21n} \\ b_{33n} & b_{32n} & b_{34n} & b_{31n} \\ b_{43n} & b_{42n} & b_{44n} & b_{41n} \end{vmatrix}; \quad (149)$$

при нагружении пластины на внутренний несущий слой

$$\Omega_{1n}^* = q_{1n} \begin{vmatrix} b_{13n} & b_{12n} & b_{14n} \\ b_{23n} & b_{22n} & b_{24n} \\ b_{33n} & b_{32n} & b_{34n} \end{vmatrix}; \quad \Omega_{2n}^* = -q_{1n} \begin{vmatrix} b_{13n} & b_{12n} & b_{14n} \\ b_{21n} & b_{22n} & b_{24n} \\ b_{31n} & b_{32n} & b_{34n} \end{vmatrix}; \\ \Omega_{3n}^* = q_{1n} \begin{vmatrix} b_{13n} & b_{12n} & b_{14n} \\ b_{13n} & b_{22n} & b_{24n} \\ b_{13n} & b_{32n} & b_{34n} \end{vmatrix}; \quad \Omega_{4n}^* = q_{1n} \begin{vmatrix} b_{13n} & b_{12n} & b_{14n} \\ b_{21n} & b_{22n} & b_{24n} \\ b_{31n} & b_{32n} & b_{34n} \end{vmatrix}; \quad (150)$$

при нагружении пластины на наружный несущий слой

$$\Omega_{1n}^* = -q_{1n} \begin{vmatrix} b_{13n} & b_{12n} & b_{14n} \\ b_{23n} & b_{22n} & b_{24n} \\ b_{33n} & b_{32n} & b_{34n} \end{vmatrix}; \quad \Omega_{2n}^* = q_{1n} \begin{vmatrix} b_{13n} & b_{12n} & b_{14n} \\ b_{21n} & b_{22n} & b_{24n} \\ b_{31n} & b_{32n} & b_{34n} \end{vmatrix}; \\ \Omega_{3n}^* = -q_{1n} \begin{vmatrix} b_{11n} & b_{12n} & b_{14n} \\ b_{11n} & b_{22n} & b_{24n} \\ b_{11n} & b_{32n} & b_{34n} \end{vmatrix}; \quad \Omega_{4n}^* = q_{1n} \begin{vmatrix} b_{11n} & b_{12n} & b_{14n} \\ b_{21n} & b_{22n} & b_{24n} \\ b_{31n} & b_{32n} & b_{34n} \end{vmatrix}. \quad (151)$$

Здесь  $b_{11n}$ ,  $b_{12n}$ ,  $b_{13n}$ ,  $b_{14n}$  определяются выражениями (134), а остальные коэффициенты матрицы  $\Omega_{kn}^*$  равны

$$b_{23n}^* = \left[ -a_{131} \left( \frac{\pi n}{l_0} \right)^4 + a_{331} \right] \frac{\pi n}{l_0}; \\ b_{24n}^* = -a_{141} \left( \frac{\pi n}{l_0} \right)^4 - a_{441}; \\ b_{34n}^* = \left[ -a_{141} \left( \frac{\pi n}{l_0} \right)^4 + a_{441} \right] \frac{\pi n}{l_0}; \\ b_{32n}^* = a_{221} \left( \frac{\pi n}{l_0} \right)^4 + a_{321} + a_{421}; \\ b_{24n}^* = \left[ -a_{241} \left( \frac{\pi n}{l_0} \right)^4 + a_{441} \right] \frac{\pi n}{l_0}; \quad (152) \\ b_{34n}^* = \left[ -2a_{141} \left( \frac{\pi n}{l_0} \right)^4 + a_{441} \right] \frac{\pi n}{l_0}; \\ b_{13n}^* = a_{331} \left( \frac{\pi n}{l_0} \right)^4 + a_{431}.$$

Изгибающие моменты и перерезывающие силы в несущих слоях определяются из выражений:

$$M_1 = -D_1 \frac{d^2 u_1}{dx^2}; \quad Q_1 = -D_1 \frac{du_1}{dx}; \quad (153) \\ M_2 = -D_2 \frac{d^2 u_2}{dx^2}; \quad Q_2 = -D_2 \frac{du_2}{dx}.$$

Напряжения сдвига в заполнителе на границе с несущими слоями могут быть рассчитаны по формуле (135), а напряжение сжатия в заполнителе определяется из выражения

$$\sigma_{xy} = \frac{F_x}{l_0} \sum_{n=1}^{\infty} (L_{3n} - L_{4n}) \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (154)$$

При нагружении пластины по обеим несущим слоям перемещения несущих слоев определяются суммированием перемещений, вычисленных каждой из них  $\varphi$  в отдельности. При расчете пластины, нагруженной сосредоточенной силой  $P$ , приложенной в точке  $x = \frac{l}{4}$  (рис. 80), в выражениях (150) и (151) при отсутствии подкрепляющего элемента в точке приложения силы есть в выражениях (132) и (133) при наличии такого элемента необходимо принять

$$q_{11} = \frac{2P}{\pi n} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi l}{4}. \quad (155)$$

Приближенное значение прогиба балки, нагруженной сосредоточенной силой в точке  $\eta =$  имеющей в этой точке подкрепляющий элемент, равно

$$w = \frac{EP}{E^2 D_{12}} \sum_{n=1,2,3} \frac{\sin \frac{n\pi\eta}{a}}{\frac{n^2}{a^2} \left( \frac{a^2}{c^2} - \rho_1^2 \right)} \sin \frac{n\pi x}{a}. \quad (156)$$

Для получения точности расчета деформации пластины в 5–6% при использовании рядов (132) или (148) следует брать 5–8 членов ряда. Значения прогибов в пластины, нагру-

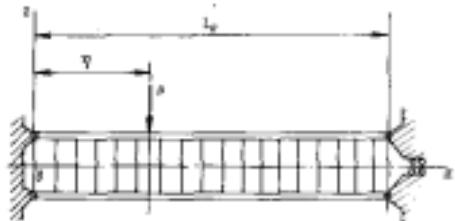


Рис. 80. Схема нагружения трехслойной пластины при трехмерном западении сосредоточенной силой.

женной рассматриваемым типами нагрузки и не подкрепленной усиливающими элементами на расстоянии 3–5 толщин пластин от границы нагруженного участка, могут рассчитываться по формулам (132) и (133). Знания прогибов  $w$  и  $w_y$ , полученные при решении задач с использованием выражений (156) и (151), используются в основном для проверки прочности заполнителя.

**Расчет трехслойной пластины, нагруженной силами, действующими в плоскости средней поверхности несущих слоев (рис. 81).** При нагружении трехслойной пластины силами, действующими в плоскости средней поверхности несущих слоев, интенсивность изменения прогибов несущих слоев по длине пластины вследствие отсутствия поперечной нагрузки есть величина, что представляется возможным приобрести всеми производными прогиба по длине, начиная со второй.

В этом случае  $w_1$  и  $w_2$  не зависят от  $w$ , т. е. при определении  $w_1$  и  $w_2$  можно принять  $w_1=w_2$  произвольными, в том числе и

различными между собой. Тогда система примет вид

$$\left. \begin{aligned} a_{311} \frac{d^2 w_1}{dx^2} + a_{312} w_1 + a_{321} \frac{d^2 w_2}{dx^2} + a_{322} w_2 + X_1 &= 0; \\ a_{321} \frac{d^2 w_1}{dx^2} + a_{322} w_1 + a_{331} \frac{d^2 w_2}{dx^2} + a_{332} w_2 + X_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (157)$$

Решение однородной системы уравнений будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= C_1 N_1 e^{N_1 x} + C_2 N_2 e^{-N_2 x} + \frac{1}{1-N_1} C_3 x + \frac{1}{1-N_2} C_4; \\ w_2 &= C_5 e^{N_1 x} + C_6 e^{-N_2 x} + C_7 \frac{1}{1-N_1} x + C_8 \frac{1}{1-N_2}. \end{aligned} \right\} \quad (158)$$

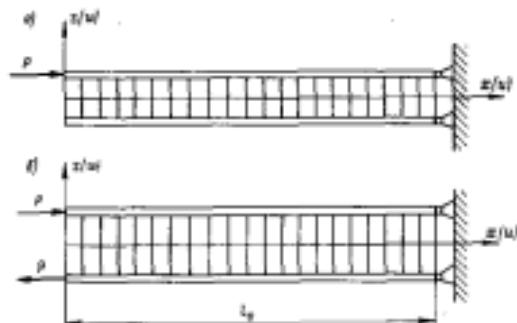


Рис. 81. Схема нагружения трехслойной пластины на один слой: (a) в паре сжатия, действующим на среднюю поверхности и направляемым в разные стороны; (b).

Здесь  $C_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) — произвольные постоянные, определяемые из граничных условий на краях несущих слоев  $x=0$ ;  $x=l_y$ ;  $N_1$  и  $N_2$  — постоянные, зависящие от параметров пластины, и определяемые выражениями

$$N_1 = -\frac{a_{311} - a_{321}}{a_{312} - a_{322}}, \quad N_2 = -\frac{a_{321}(1-N_1)}{a_{331}N_1 - a_{332}}. \quad (159)$$

Возникающие при такой схеме нагружения напряжения единица в заполнителе равны

$$\sigma_{xy_1} = \frac{G_{M_3}}{l_y} (w_1 - w_2). \quad (160)$$

Ниже приводятся формулы для определения перемещений несущих слоев в некоторых случаях закрепления края пластины.

1. При  $x=0$  верхний несущий слой нагружен погонной нагрузкой интенсивностью  $P_1$ , а нижний свободен. При  $x=l_0$  оба слоя защемлены (рис. 81, а).

Границные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{при } x=0 \quad \frac{du_1}{dx} = -\frac{P_1}{B_1}; \quad \frac{du_2}{dx} = 0; \\ \text{при } x=l_0 \quad u_1 = u_2 = 0. \end{aligned} \quad (161)$$

Перемещения верхнего несущего слоя определяются из выражения

$$u_1 = \frac{P_1}{B_1} \cdot \frac{1}{N_1} \cdot \frac{1}{1 + e^{-N_1 x}} [e^{N_1(x-l_0)} - e^{-N_1 x}] + \frac{P_1}{B_1} \left( \frac{1}{1 - N_1} \right) (x - l_0). \quad (162)$$

Перемещения нижнего несущего слоя равны

$$u_2 = \frac{P_1}{B_1} \cdot \frac{1}{N_1 N_2} \cdot \frac{1}{1 + e^{-N_1 l_0}} [e^{N_1(x-2l_0)} - e^{-N_1 x}] + \frac{P_1}{B_1} \frac{1}{1 - N_1} (x - l_0). \quad (163)$$

2. Одним из важных для практики случаев является нагружение несущих слоев на крае  $x=0$  равниной противоположного направлением схемы (рис. 81, б).

Эта схема возникает при нагружении пластины изгибающим моментом и называется в трехслойной балке напряжения, затухающие во мере удаления от края. Вследствие этого напряжения и несущих слои и смещения слоев вдали от края становятся равными нулю. Напряженное состояние в трехслойной балке при такой схеме нагружения эквивалентно напряженному состоянию в зоне краевого эффекта замкнутой планиграфической оболочки.

Границные условия для этого случая имеют вид

$$\begin{aligned} \text{при } x=0 \quad \frac{du_1}{dx} = -\frac{P_1}{B_1}; \quad \frac{du_2}{dx} = -\frac{P_1}{B_2}; \\ \text{при } x=l_0 \quad u_1 = u_2 = 0. \end{aligned} \quad (164)$$

Перемещения несущих слоев при этом равны

$$\begin{aligned} u_1 = -\frac{P_1}{N_1} \cdot \frac{N_1}{1 - N_1} \cdot \frac{B_1 + B_2}{B_1 B_2} \times \\ \times \frac{1}{e^{N_1 l_0} + e^{-N_1 l_0}} [e^{N_1(x-l_0)} - e^{-N_1(x-l_0)}] + \frac{P_1}{B_1} \left( 1 + \frac{N_1 B_1}{B_2} \right) (x - l_0); \\ u_2 = -\frac{P_1}{N_2} \cdot \frac{1}{(1 - N_1)} \cdot \frac{B_1 + B_2}{B_1 B_2} \cdot \frac{1}{e^{N_1 l_0} - e^{-N_1 l_0}} \times \\ \times [e^{-N_1(x-l_0)} - e^{-N_1(x-2l_0)}] + \frac{P_1}{B_1} \left( 1 + \frac{N_1 B_1}{B_2} \right) (x - l_0). \end{aligned} \quad (165)$$

Напряжения в несущих слоях определяются выражениями

$$\begin{aligned} \sigma_{x_1} = \frac{P N_{1,0}}{(1 - N_1)} \cdot \frac{B_1 + B_2}{B_1 B_2} e^{-N_1 x} + \frac{P}{B_1} \left( 1 + \frac{N_1 B_1}{B_2} \right); \\ \sigma_{x_2} = \frac{P}{(1 - N_1)} \cdot \frac{B_1 + B_2}{B_1 B_2} e^{-N_1 x} + \frac{P}{B_1} \left( 1 + \frac{N_1 B_1}{B_2} \right). \end{aligned} \quad (166)$$

При выводе выражения (166) преобразуем величинами  $e^{-N_1 l_0}$  по сравнению с  $e^{-N_1 x}$ .

Относительное смещение несущих слоев в направлении касательной к средней поверхности балки равно

$$\Delta u_p = u_1 - u_2 = -\frac{P}{N_1} \cdot \frac{B_1 - B_2}{B_1 B_2} e^{-N_1 x}. \quad (167)$$

Цилиндрический элемент трехслойной пластины с закономерностью. Зависимости, полученные выше, позволяют произвести расчет напряженного состояния трехслойной балки с закономерностью нагружения произвольной нагрузкой.

Назадим величину смещения несущих слоев в направлении касательной к средней поверхности при цилиндрическом изгибе

$$\Delta u_p = u_1 - u_2 = (L_{2n} - L_{3n}) \cos \frac{\pi x}{l_0}. \quad (168)$$

В том случае, когда пластина имеет закономерность, смещение слоев на концах должно равняться нулю, т. е. действие закономерности эквивалентно действию двух разных и противоположно направленных сил, которые создают смещение слоев, равное по величине и противоположное по знаку смещению  $\Delta u_p$ , возникшему при изгибе.

Следовательно, можно записать при  $x=0$

$$\Delta u_p + \Delta u_p = 0. \quad (169)$$

Подставив вместо выражений для  $\Delta_{1x}$  и  $\Delta_{2y}$  их значения, получим

$$-\frac{P}{K_1} \cdot \frac{B_1 - B_2}{B_1 B_2} + (L_{1m} - L_{2m}) = 0. \quad (170)$$

Отсюда найдем значение  $P$ :

$$P = \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} N_2 (L_{1m} - L_{2m}). \quad (171)$$

Следовательно, полное смещение слоев трехслойной пластины с закопченками при цилиндрическом изгибе равно

$$\Delta_h = (L_{1m} - L_{2m}) \left( \cos \frac{\pi m y}{l_0} - e^{-\lambda_m y} \right). \quad (172)$$

Касательные напряжения на граничес, несущей слой-закопченность, могут быть определены по формуле (160).

*Изгиб трехслойной прямоугольной пластины нагружкой, перпендикулярной к средней линии поверхности.* В настоящем параграфе рассмотрен изгиб трехслойной прямоугольной пластины, у которой кромки несущих слоев в сечениях  $x=0$ ,  $x=a$ ,  $y=0$ ,  $y=b$  шарнирно спрятаны в соединениях диафрагмами, абсолютно жесткими в своей плоскости и абсолютно податливыми из своей плоскости.

Границные условия при таком способе описания будут иметь вид

$$w = 0; M_x = 0 \text{ при } x = 0, x = a;$$

$$w = 0; M_y = 0 \text{ при } y = 0, y = b;$$

$$u_1 = 0; v_x = 0 \text{ при } x = \frac{a}{2}, y = \frac{b}{2}, y = 0, y = b;$$

$$u_1 = 0; v_x = 0 \text{ при } y = \frac{b}{2}, x = \frac{a}{2}, x = 0, x = a. \quad (173)$$

Изгиб пластины под действием концентрической равномерно распределенной нагрузки (рис. 82). Нагрузка может быть представлена в виде ряда

$$q = \frac{16q_0}{\pi} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{n=1,1,1,\dots} \frac{1}{mn} \sin \frac{m\pi x}{l_0} \sin \frac{n\pi y}{l_0}. \quad (174)$$

Перемещения несущих слоев оболочки определяются из выражений

$$u_1 = \sum_n \sum_s L_{1mn}^* \cos \lambda x \sin \lambda y,$$

$$u_2 = \sum_n \sum_s L_{2mn}^* \cos \lambda x \sin \lambda y,$$

$$v_1 = \sum_n \sum_s L_{3mn}^* \sin \lambda x \cos \lambda y; \quad (175)$$

$$v_2 = \sum_n \sum_s L_{4mn}^* \sin \lambda x \cos \lambda y;$$

$$w = \sum_n \sum_s L_{5mn}^* \sin \lambda x \cos \lambda y$$

$$(m = 1, 3, 5 \dots, n = 1, 3, 5 \dots)$$

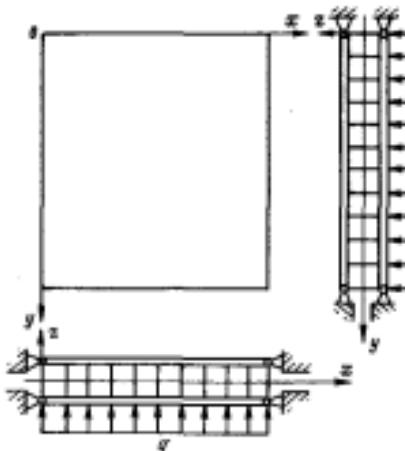


Рис. 82. Схема нагружения трехслойной пластины равномерно распределенной нагрузкой.

Постоянные  $L_{1mn}^*$ — $L_{5mn}^*$  могут быть определены из выражений

$$L_{1mn}^* = q_{mn} \frac{A_{1mn}}{\Delta_{mn}^*}; \quad L_{2mn}^* = q_{mn} \frac{A_{2mn}}{\Delta_{mn}^*}; \quad L_{3mn}^* = q_{mn} \frac{A_{3mn}}{\Delta_{mn}^*}; \quad (176)$$

$$L_{4mn}^* = q_{mn} \frac{A_{4mn}}{\Delta_{mn}^*}; \quad L_{5mn}^* = q_{mn} \frac{A_{5mn}}{\Delta_{mn}^*},$$

где  $\Delta_{mn}$  — определитель системы, приведенной в табл. 34, полученный путем подстановки значений  $a_{1,2}$ ,  $v_{1,2}$ ,  $w$  и их производных:

$$\Delta_{mn} = \begin{vmatrix} b_{1mn} & b_{2mn} & b_{3mn} & b_{4mn} & b_{5mn} \\ b_{1nm} & b_{2nm} & b_{3nm} & b_{4nm} & b_{5nm} \\ b_{2mn} & b_{3mn} & b_{4mn} & b_{5mn} & b_{6mn} \\ b_{3mn} & b_{4mn} & b_{5mn} & b_{6mn} & b_{7mn} \\ b_{4mn} & b_{5mn} & b_{6mn} & b_{7mn} & b_{8mn} \end{vmatrix}; \quad (177)$$

$$b_{1mn} = b_{1mn}, \quad b_{2mn} = b_{2mn}, \quad b_{3mn} = b_{3mn}, \quad b_{4mn} = b_{4mn},$$

$A'_{mn}$  — азимутка элемента  $b'_{mn}$  определителя (177).

Элементы определителя  $b'_{mn}$  разны

$$b'_{1mn} = -(a_{mn} + a_{1m})(\lambda^2 + \gamma^2) + (a_{mn} + a_{1m});$$

#### Система уравнений равновесия

$u_1$	$u_2$	$u_3$
$a_{mn} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_{1mn} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - a_{11m}$	$a_{mn} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_{1mn} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{2mn}$	$a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial xy^2}$
$a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_{2mn} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - a_{21m}$	$a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_{2mn} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - a_{21m}$	$a_{21m} \frac{\partial^2}{\partial xy^2}$
$v_{12} \frac{\partial^2}{\partial xy^2}$	$a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial xy^2}$	$a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{12m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{11m}$
$a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial xy^2}$	$a_{21m} \frac{\partial^2}{\partial xy^2}$	$a_{21m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{12m} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + a_{11m}$
$[(a_{mn} - a_{11m}) V^2 -$ $- (a_{mn} - a_{11m})] \frac{\partial}{\partial x}$	$\left[ \left( 2a_{mn} - \frac{a_{11m}}{2} \right) V^2 +$ $- (a_{mn} - a_{11m}) \frac{\partial}{\partial x} \right]$	$[(a_{11m} + a_{21m}) V^2 -$ $- (a_{11m} + a_{21m})] \frac{\partial}{\partial y}$

$$b'_{1mn} = - \left( \frac{a_{mn}}{2} + 2a_{1mn} \right) (\lambda^2 + \gamma^2) + (a_{mn} + a_{1mn}); \quad (178)$$

$$b'_{2mn} = (a_{mn} + a_{1mn} - 2a_{11m}) (\lambda^2 + \gamma^2) +$$

$$+ (a_{mn} - a_{1mn} - a_{21m}) (\lambda^2 + \gamma^2),$$

$$(n = k = 1).$$

Остальные элементы определителя  $b'_{mn}$  находят из табл. 35 при  $m = 1, 3, 5, \dots$ ,  $n = 1, 3, 5, \dots$ .

В выражениях (178) введены обозначения  $\lambda = \frac{m\pi}{a}$  и  $\gamma = \frac{n\pi}{b}$ , а в выражении (172)  $q_{mn}$  равно

$$q_{mn} = \frac{16q_0}{\pi^2} \cdot \frac{1}{mn}$$

$$(m = 1, 3, 5, \dots, n = 1, 3, 5, \dots).$$

Таблица 34

#### Предельный напряжение при $u_1 = u_2$

$u_1$	$u_2$	Свободный член
$a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial xy^2}$	$[(a_{mn} - a_{11m}) V^2 +$ $+ (a_{mn} + a_{11m})] \frac{\partial}{\partial y}$	$X_1$
$a_{21m} \frac{\partial^2}{\partial xy^2}$	$\left[ \left( \frac{a_{11m}}{2} - 2a_{21m} \right) V^2 +$ $- (a_{mn} - a_{21m}) \frac{\partial}{\partial x} \right]$	$X_2$
$a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - a_{21m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{11m}$	$[(a_{11m} - a_{21m}) V^2 -$ $- (a_{11m} + a_{21m})] \frac{\partial}{\partial y}$	$V_1$
$a_{21m} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - a_{11m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - a_{21m}$	$\left[ \left( \frac{a_{11m}}{2} - 2a_{21m} \right) V^2 +$ $- (a_{mn} - a_{21m}) \frac{\partial}{\partial y} \right]$	$V_2$

Таблица 85

Коэффициенты  $\delta_{mn}$  систем линейных уравнений

$\delta_{11}$	$-a_{11}(\beta + \gamma^2) - a_{11}\beta^2 - a_{11}\gamma$
$\delta_{12}$	$-a_{11}\beta^3 - a_{11}\gamma^3 - a_{11}\gamma$
$\delta_{13}$	$-a_{11}\gamma^2$
$\delta_{14}$	$-a_{11}\beta\gamma$
$\delta_{15}$	$-a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}\gamma$
$\delta_{16}$	$-a_{11}(\beta^2 - \gamma^2) + a_{11}\gamma$
$\delta_{17}$	$-a_{11}\beta^3 - a_{11}\gamma^3 - a_{11}\beta$
$\delta_{18}$	$-a_{11}\beta\gamma$
$\delta_{19}$	$-a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}\beta$
$\delta_{20}$	$-a_{11}(\beta^2 - \gamma^2) + a_{11}\beta$
$\delta_{21}$	$-2a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}\gamma$
$\delta_{22}$	$-a_{11}\beta^3 - a_{11}\gamma^3 - a_{11}\beta$
$\delta_{23}$	$-a_{11}\beta^2 - a_{11}\gamma^2 + a_{11}\gamma$
$\delta_{24}$	$-a_{11}(\beta^2 - \gamma^2) + a_{11}\gamma$
$\delta_{25}$	$= \frac{a_{11}}{2}(\beta^2 + \gamma^2) - a_{11}\gamma$
$\delta_{26}$	$-2a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}\beta$
$\delta_{27}$	$-a_{11}\beta^3 - a_{11}\gamma^3 - a_{11}\beta$
$\delta_{28}$	$-a_{11}\beta^2 - a_{11}\gamma^2 + a_{11}\beta$
$\delta_{29}$	$-a_{11}(\beta^2 - \gamma^2) + a_{11}\beta$
$\delta_{30}$	$= \frac{a_{11}}{2}(\beta^2 + \gamma^2) - a_{11}\beta$
$\delta_{31}$	$a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) - a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}\gamma$
$\delta_{32}$	$a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) - a_{11}\gamma$
$\delta_{33}$	$-a_{11}(\beta^2 - \gamma^2) - a_{11}\gamma$
$\delta_{34}$	$-2a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}\beta$
$\delta_{35}$	$-a_{11}\beta^3 - a_{11}\gamma^3 - a_{11}\beta$
$\delta_{36}$	$-a_{11}\beta^2 - a_{11}\gamma^2 + a_{11}\beta$
$\delta_{37}$	$-a_{11}(\beta^2 - \gamma^2) + a_{11}\beta$
$\delta_{38}$	$= a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) - a_{11}\beta$
$\delta_{39}$	$a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) - a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}\gamma$
$\delta_{40}$	$a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) + a_{11}(\beta^2 + \gamma^2) - a_{11}\gamma$
$\delta_{41}$	$-a_{11}(\beta^2 - \gamma^2) - a_{11}\gamma$

Напряжения сдвига в заполнителе на границе с несущими слоями равны:

— в направлении оси  $x$ 

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{k_3} \sum_m \sum_n (L_{mn}^+ - L_{mn}^-) \cos kx \sin \gamma y; \quad (179)$$

— в направлении оси  $y$ 

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{k_3} \sum_m \sum_n (L_{mn}^+ - L_{mn}^-) \sin kx \cos \gamma y \quad (m = 1, 3, 5, \dots, n = 1, 3, 5, \dots). \quad (180)$$

Изгибающие и крутящие моменты в несущих слоях могут быть определены из выражений

$$M_{x_{1,2}} = -D_{1,2} \left( \frac{\partial w}{\partial y^2} + v_{1,2} \frac{\partial w}{\partial x^2} \right);$$

$$M_{x_{1,2}} = -D_{1,2} \left( \frac{\partial w}{\partial x^2} + v_{1,2} \frac{\partial w}{\partial y^2} \right);$$

$$M_{x_{1,2}} = -M_{x_{1,2}} = D_{1,2} (1 - v_{1,2}) \frac{\partial w}{\partial xy}. \quad (181)$$

Перерезывающие силы равны

$$Q_{y_{1,2}} = -D_{1,2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial w}{\partial x^2} + \frac{\partial w}{\partial y^2} \right);$$

$$Q_{y_{1,2}} = -D_{1,2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial w}{\partial x^2} + \frac{\partial w}{\partial y^2} \right). \quad (182)$$

Приближенное прогиб трехслойной пластины может быть определено из выражения

$$w = \frac{16q_0}{\pi^2 D_2} \sum_{i=1,3,5} \sum_{j=1,3,5} \frac{1}{\left( \frac{\alpha^2}{a^2} + \frac{\beta^2}{b^2} \right) \left[ \alpha^2 \left( \frac{\alpha^2}{a^2} + \frac{\beta^2}{b^2} \right) - 2B \right]} \times \\ \times \sin \frac{\pi \alpha y}{a} \sin \frac{\pi \beta y}{b},$$

где

$$B^2 = \frac{a_{11} - a_{31} - a_{51} + a_{71}}{2D_2}. \quad (183)$$

Для получения с помощью выражений (175) параметров деформации пластины с точностью в 3–5% необходимо использовать 3–4 члена ряда.

Намыб пластинам под действием поперечной нагрузки, распределенной по части несущего слоя (рис. 83). При действии

распределенной нагрузки, приложенной к перпендикулярной срединной поверхности части несущего слоя размерами  $\Delta \times a$ , нагрузка может быть представлена в виде ряда

$$q = \frac{16P}{\pi b^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{mn} \sin \frac{m\pi h}{a} \sin \frac{n\pi g}{b} \sin \frac{m\pi z_1}{a} \sin \frac{n\pi z_2}{b} \times \\ \times \sin \frac{m\pi h}{a} \sin \frac{n\pi g}{b}, \quad (184)$$

здесь  $h$  и  $g$  — координаты центра площадки относительно осей  $x$  и  $y$ .

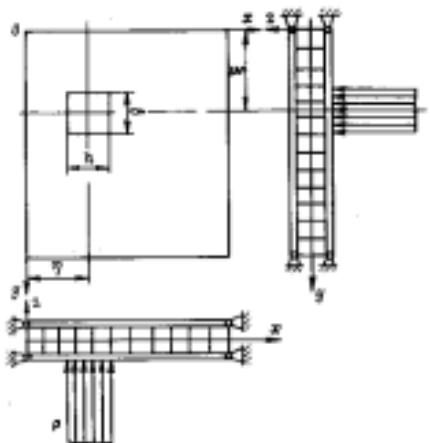


Рис. 83. Схема нагружения трехслойной пластины из-за равномерно распределенной нагрузки на части поверхности.

В случае если в зоне приложения нагрузки установлен подкрепляющий элемент, модуль сжатия материала которого значительно больше, чем модуль сжатия заполонителя (т. е.  $E_{\text{ст}} \gg E_{\text{з}}$ ), перемещения несущих слоев определяются по формулам (185), где  $m=1, 2, 3, \dots$ ;  $n=1, 2, 3, \dots$

$$q_{mn} = \frac{16P}{\pi b^2} \sin \frac{m\pi h}{a} \sin \frac{n\pi g}{b} \sin \frac{m\pi z_1}{a} \sin \frac{n\pi z_2}{b}. \quad (185)$$

В том случае когда  $z_1 = \frac{h}{2}$  и  $z_2 = \frac{b}{2}$ , т. е. центр пластины

совпадает с центром участка нагружения, вместо ряда (184) имеем ряд (186):

$$q_{mn} = \frac{16P}{\pi b^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{mn} \sin \frac{m\pi h}{a} \sin \frac{n\pi g}{b} \sin \frac{m\pi z}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (186)$$

$$(m=1, 3, 5, \dots; n=1, 3, 5, \dots).$$

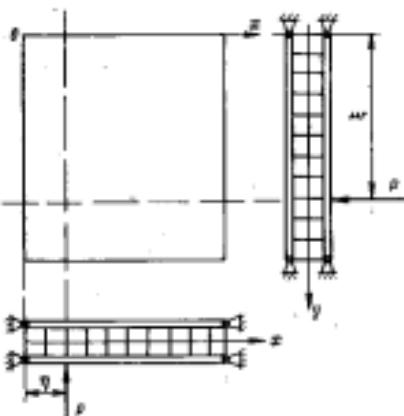


Рис. 84. Схема нагружения трехслойной пластины суперпозицией сил.

Коэффициенты рядов, определяющих перемещение несущих слоев, равны (186) при

$$q_{mn} = \frac{16P}{\pi b^2} \cdot \frac{1}{mn} \sin \frac{m\pi h}{a} \sin \frac{n\pi g}{b} \quad (m=1, 3, 5, \dots; n=1, 3, 5, \dots). \quad (187)$$

В случае если размеры площадки стремятся к нулю, т. е.  $h \rightarrow 0$  и  $b \rightarrow 0$  (рис. 84), вместо выражения (187) получим

$$q = \frac{16P}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{mn} \sin \frac{m\pi z}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{m\pi h}{a} \sin \frac{n\pi g}{b}. \quad (188)$$

Из выражений (175) находим прогибы касательные перемещения несущих слоев при

$$q_{\text{пл}} = \frac{MP}{\sigma} \cdot \frac{1}{m} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} ;$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots, n = 1, 2, 3, \dots). \quad (189)$$

При приложении нагрузки в центре пластины с координатами  $x = \frac{a}{2}$ ;  $y = \frac{b}{2}$  перемещения несущих слоев определяются из выражения (175) при

$$q_{\text{пл}} = \frac{16P}{\sigma b} \cdot \frac{1}{m} . \quad (190)$$

Напряжения сдвига в заполнителе на границе с несущими слоями в случае нагружения пластины в точке  $x=\frac{a}{2}$  и  $y=\frac{b}{2}$  определяются по формулам (179), (180) при  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$

Приближенное значение прогиба можно получить:

— при нагружении сосредоточенной силой, приложенной в точках  $x=\eta$  и  $y=\zeta$ , по формуле

$$w = \frac{4P}{\sigma^2 D_{ab}} \sum_{i=1,2,3} \sum_{k=1,2,3} \frac{\sin \frac{\pi i k x}{a} \sin \frac{\pi k y}{b}}{\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left[ \pi^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - 2B^2 \right]} \times$$

$$\times \sin \frac{\pi \eta x}{a} \sin \frac{\pi \zeta y}{b} ; \quad (191)$$

— при нагружении сосредоточенной силой  $P$ , приложенной в середине пластины, по формуле

$$w = \frac{4P}{\sigma^2 D_{ab}} \sum_{i=1,2,3} \sum_{k=1,2,3} \frac{\sin \frac{\pi i k x}{a} \sin \frac{\pi k y}{b}}{\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left[ \pi^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - 2B^2 \right]} . \quad (192)$$

Другим важным в практическом отношении случаем является нагружение пластины сосредоточенной силой, нормальной к срединной поверхности заполнителя, без установки подкрепляющего элемента в зоне нагружения при существенно различных жесткостях несущих слоев.

Для решения задачи используется система дифференциальных уравнений, приведенная в табл. 31.

Границные условия для прямого способа опирания следующие:

$$\begin{aligned} &\text{при } x = 0, \quad x = a \quad w_1 = 0, \quad M_{x_1} = 0; \\ &\text{при } x = 0, \quad x = a \quad w_2 = 0, \quad M_{x_2} = 0; \\ &\text{при } y = 0, \quad y = b \quad w_1 = 0, \quad M_{y_1} = 0; \\ &\text{при } y = 0, \quad y = b \quad w_2 = 0, \quad M_{y_2} = 0; \\ &\text{при } x = \frac{a}{2}, \quad y = \frac{b}{2}, \quad y = 0, \quad y = b \quad w_1 = 0, \quad w_2 = 0; \\ &\text{при } y = \frac{b}{2}, \quad x = 0, \quad x = a \quad v_1 = 0, \quad v_2 = 0. \quad (193) \end{aligned}$$

Все граничные условия будут удовлетворены, если представить решения системы уравнений табл. 31 в виде рядов

$$\begin{aligned} w_1 &= \sum_m \sum_n L_{1mn} \cos \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi n y}{b}; \\ w_2 &= \sum_m \sum_n L_{2mn} \cos \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi n y}{b}; \\ v_1 &= \sum_m \sum_n L_{3mn} \sin \frac{\pi m x}{a} \cos \frac{\pi n y}{b}; \\ v_2 &= \sum_m \sum_n L_{4mn} \sin \frac{\pi m x}{a} \cos \frac{\pi n y}{b}; \\ w_1 &= \sum_m \sum_n L_{5mn} \sin \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi n y}{b}; \\ w_2 &= \sum_m \sum_n L_{6mn} \sin \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi n y}{b}. \quad (194) \end{aligned}$$

Постоянные  $L_{ijn}$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ ) выбираются так, чтобы удовлетворялась система, приведенная в табл. 31. Это условие соблюдается, если принять для постоянных следующие выражения:

$$L_{1mn} = \frac{16P}{\sigma^2 D_{ab}} \cdot \frac{1}{m} \sin \frac{\pi m h}{a} \sin \frac{\pi n g}{b} \sin \frac{\pi m l}{a} \sin \frac{\pi n f}{b} \cdot \frac{M_{ab,kl}}{D_{mn}};$$

$$l = 1 - 6; \quad k = 5; 6, \quad (195)$$

где при нагружении панели на верхний несущий слой  $k=5$ , при нагружении на нижний несущий слой  $k=6$ .

$\Delta_{\text{алл}}$  — определитель системы алгебраических уравнений, полученной из системы (табл. 31) подстановкой значений  $a_{1,5}$ ,  $a_{1,6}$ ,  $a_{1,7}$ :

$$\Delta_{\text{алл}} = \begin{vmatrix} b_{11\text{алл}} & b_{12\text{алл}} & b_{13\text{алл}} & b_{14\text{алл}} & b_{15\text{алл}} & b_{16\text{алл}} \\ b_{12\text{алл}} & b_{22\text{алл}} & b_{23\text{алл}} & b_{24\text{алл}} & b_{25\text{алл}} & b_{26\text{алл}} \\ b_{13\text{алл}} & b_{23\text{алл}} & b_{33\text{алл}} & b_{34\text{алл}} & b_{35\text{алл}} & b_{36\text{алл}} \\ b_{14\text{алл}} & b_{24\text{алл}} & b_{34\text{алл}} & b_{44\text{алл}} & b_{45\text{алл}} & b_{46\text{алл}} \\ -b_{15\text{алл}} & -b_{25\text{алл}} & -b_{35\text{алл}} & -b_{45\text{алл}} & b_{55\text{алл}} & b_{56\text{алл}} \\ -b_{16\text{алл}} & -b_{26\text{алл}} & -b_{36\text{алл}} & -b_{46\text{алл}} & b_{56\text{алл}} & b_{66\text{алл}} \end{vmatrix}; \quad (196)$$

$A_{k\text{алл}}$  — адъюнкты элемента  $b_{k\text{алл}}$  определителя (196).

При нагружении пластинами сосредоточенной силой выражения для перемещений несущих слоев могут быть получены из (195) при  $k=0$ ,  $q=0$ :

$$L_{1m} = \frac{16P}{\pi^2} \cdot \frac{1}{mn} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \cdot \frac{A_{k\text{алл}}}{\Delta_{\text{алл}}} \quad (m=1, 2, 3, \dots, n=1, 2, 3, \dots), \quad (197)$$

где  $k=5$  при загружении на верхний несущий слой,  $k=6$  при загружении на нижний несущий слой.

В случае если нагрузка приложена к центру пластины с координатами  $x=\frac{a}{2}$ ,  $y=\frac{b}{2}$ , постоянные  $L_{1m}$  будут равны:

$$L_{1m} = \frac{16P}{\pi^2} \cdot \frac{1}{mn} \cdot \frac{A_{k\text{алл}}}{\Delta_{\text{алл}}} \quad (m=1, 2, 3, \dots, n=1, 2, 3, \dots). \quad (198)$$

Касательные напряжения в заполнителе при действии сосредоточенной силы в центре пластины на границе с несущими слоями могут быть определены по формулам (179), (180), а напряжение сжатия в заполнителе — по формуле

$$\sigma_x = \frac{E_2}{t_2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (L_{1m} - L_{0m}) \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}. \quad (199)$$

Изгибающие и крутящие моменты в несущих слоях определяются из выражений (181), (182).

Для определения параметров деформации по формулам (175) или (194) в случае нагружения сосредоточенными или распределенными по части поверхности скажем достаточно использовать 9–12 членов ряда. В тех случаях нагружения

трехслойных пакетов, которые не рассматриваются в настоящей работе, для расчетов рекомендуется пользоваться справочным пособием [3].

## § 27. Схема работы сетевого заполнителя в трехслойной конструкции

Сотовые заполнители являются пространственной конструкцией, выполняющей роль подкрепляющего основания для сравнительно тонких несущих слоев. Размеры и форму сотогов необходимо выбирать таким образом, чтобы в их контуре напряжения местной потери устойчивости участка несущего слоя находились в пластичной области. Это обеспечивает сохранение формы поверхности конструкции.

Такое подкрепление возможно, если отношение наибольшего размера соты к толщине несущего слоя будет равно или меньше 25, т. е.

$$\frac{r}{t_{1,2}} \leq 25. \quad (200)$$

Как и для всякой конструкции с заполнителем, желательно, чтобы относительные жесткости несущих слоев  $\frac{E_{1,2}}{E_{1,3}}, \frac{G_{1,2}}{G_{1,3}}$  и

заполнителя  $\frac{E_2}{t_2}, \frac{G_2}{t_2}$  были равны. Это обеспечивает оптимальные параметры трехслойной конструкции. Однако практика показывает, что добиться соблюдения подобного условия при изготовлении несущих слоев и сотового заполнителя из однотипных материалов невозможно. Поэтому рационально изготавливать трехслойные конструкции комбинированного типа.

В конструкциях, работающих на сжатие, изгиб и кручение, трехслойные пакеты дают выигрыш в весе.

На рис. 85 приведены основные схемы работы заполнителя при различных условиях нагружения трехслойной конструкции. Заполнитель работает в основном на сдвиг. Деформацией заполнителя в направлении нормали к средней поверхности можно пренебречь. В зоне  $ab$  заполнитель имеет значительные деформации сжатия в направлении нормали к средней поверхности, а в зоне  $bc$  заполнитель растягивается.

Несущие слои в конструкциях, показанных на схемах, в основном работают на растяжение — сжатие. Учет изгибной жесткости несущих слоев приводится в зависимости от соответствующих параметров несущих слоев к заполнителю.

Поскольку сотовые заполнители являются тонкостенной пространственной конструкцией, им присущи все особенности работы таких конструкций. Уменьшение несущей способности сотового заполнителя при сжатии подольше направляющей, как

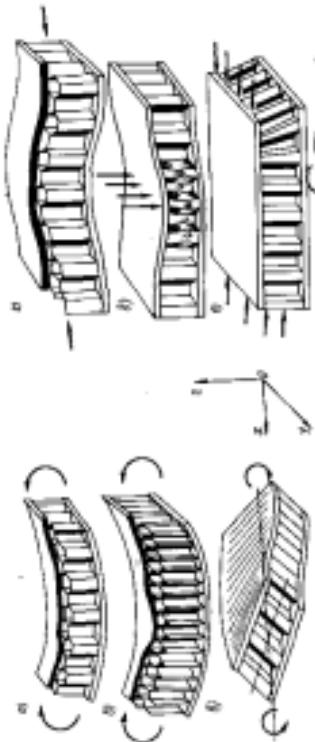


Рис. 86. Схема работы трехслойной панели при сжатии: а — верхний слой сотов; б — клеевое соединение сотов; в — продольная прочность; г — поперечная прочность; д — продольная прочность сотовых конструкций пакетом; е — поперечная прочность пакетом; ж — краевая прочность; з — поперечная прочность пакета сотовых конструкций к продольной и поперечной силам.

правило, происходит вследствие потери устойчивости стяжками сотов.

В большинстве работ, посвященных расчету трехслойных конструкций, предполагается, что связь между слоями и несущими слоями такова, что не влияет на прочностные характеристики конструкции. Подобное допущение, как показала практика, справедливо при соединении несущих слоев с заполнителем пакетом или сваркой [12]. В этом случае разрушение заполнителя происходит, как правило, по слоям. Кроме того, реологические свойства соединения таковы, что изменения характера

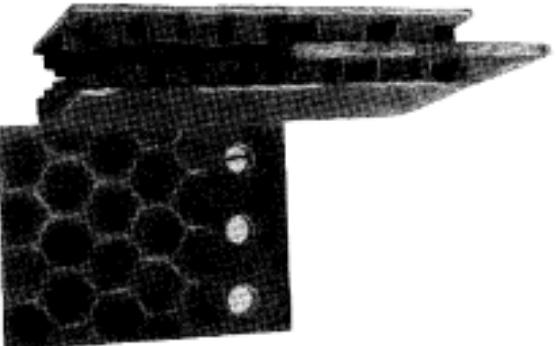


Рис. 86. Разрушение трехслойной панели при сжатии.

разрыва стенок сотов на несущий слой не наблюдается. При расчете трехслойных конструкций, собранных с несущими слоями при помощи ячеек синтетических смол, следует учитывать, что прочность на отрыв стенок сотового заполнителя при работе заполнителя за сдвиг или растяжение значительно выше, чем прочность на разрыв или сдвиг материала заполнителя, вследствие чего разрушение конструкции происходит по слоям (рис. 86). Кроме того, на прочность kleевых соединений существенно влияет временной фактор, вследствие чего при действии длительной постоянной нагрузки могут существенно изменяться условия соединения несущих слоев с заполнителем.

Основными характеристиками заполнителей, представляющими трехмерное тело, являются:

— модуль сжатия в направлении нормали к средней поверхности  $E_{sp}$ ;

- модуль сдвига в плоскостях, нормальных к срединной поверхности заполнителя  $G_{xy}, G_{yz}$ ;
- коэффициент Пуассона заполнителя  $\mu_{xy}$ ;
- предел прочности при сжатии в направлении нормали к срединной поверхности  $\sigma_{x,y}$ .

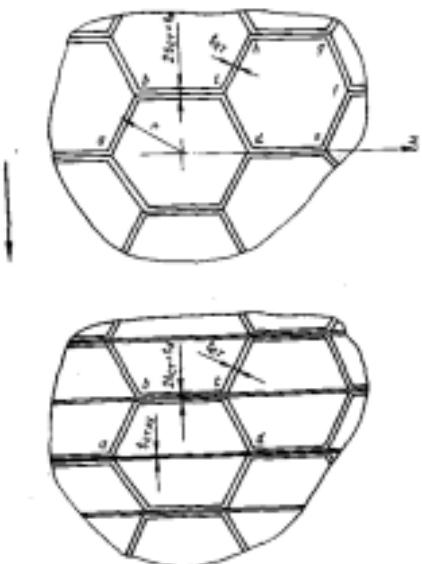


Рис. 87. Геометрические характеристики шестиугольного сотового заполнителя.

- предел прочности при сдвиге в плоскостях, нормальных к срединной поверхности заполнителя  $\tau_{xy}, \tau_{yz}$ ;
- объемная масса заполнителя  $\gamma_c$ ;
- толщина заполнителя  $\delta_c$ .

Кроме того, заполнитель может характеризоваться теплопроводностью, температуропроводностью, электропроводностью и т. п.

В связи с тем что сотовый заполнитель представляет жесткую пространственную дискретную конструкцию, при расчете он заменяется некоторым ортотропным сплошным заполнителем, обладающим теми же свойствами, что и реальный заполнитель. Характеристики такого заполнителя называются приведенными. Они позволяют выразить основные параметры от свойств материала, из которого изготовлены соты (модули сдвига и сдвига  $E_x, E_y$ ), в геометрических параметрах сотов.

Геометрические параметры сотов (рис. 87) являются:

- радиус описанной окружности  $r$  или шаг между лентами  $b_a$  и гофрами  $b_r$  (для синусоидального заполнителя);
- толщина ленты  $\delta_c$ , образующей пчелины сотов, или усилевающей ленты  $\delta_{cr}$ ;
- шаг  $f_1$  и высота  $f_2$  усилывающего гофра.

### § 28. Теоретические приведенные характеристики сотового заполнителя

В работе [5] получены выражения для определения приведенных упругих параметров шестиугольных сотовых заполнителей, выполненных из эластичного материала. Полученные выражения выведены в предположении независимости заполнителя при сдвиге от деформации по нормали к срединной поверхности. При выводе выражений для определения модуля сдвига учитывалась энергия деформации несущих слоев. Однако анализ окончательных выражений показал, что составляющая, зависящая от деформации несущих слоев, мала и может не учитываться. Приведенный модуль сдвига сотового заполнителя в плоскости узлов равен

$$G_{xy} = 1,2 \frac{G_{xy} \delta_c}{r \sqrt{3}}. \quad (201)$$

Приведенный модуль сдвига

$$G_{xy} = \frac{G_{xy} \delta_c}{r} \left[ 0,192(2s+1) + \right. \\ \left. + (s-1)^2 \frac{0,316(s-1) + 0,428(2s+1)}{(s-1)^2 - 0,269(2s+1)(s-1) - 1,3(3s+1)^2} \right], \quad (202)$$

$$\text{где } s = \frac{G_{xy} \delta_c}{G_{xy} \delta_{cr}},$$

При  $s=1$  (заполнитель, выполненный методом объемного текстилья)

$$G_{xy} = G_{xy} \frac{\delta_c}{r \sqrt{3}}. \quad (203)$$

При  $\alpha=2$  (заполнитель, изготовленный методом химической сварки)

$$G_{xy_3} = 0,879 \frac{G_{xy}}{r}, \quad (204)$$

Модуль сдвига в плоскости  $xy$

$$G_{xy_3} = \frac{\sqrt{3}}{12} \cdot \frac{b_{xy}}{r} E_x. \quad (205)$$

Коэффициент Пуассона сотового заполнителя в плоскостях  $xz$ ,  $yz$  равен нулю, а в плоскости  $xy$  при работе без несущих слоев близок к единице.

При работе заполнителя в трехслойной конструкции с симметричными несущими слоями коэффициент Пуассона можно определить из выражения

$$\begin{aligned} s_{xy_3} &= \frac{1}{E_{xy}} \left[ -B_{1,2} s_{1,2} + \left( \frac{B_{1,2}}{2} + B_{1,3} \right) \times \right. \\ &\times \left. 2(s-3)\sqrt{3} r B_{1,2} - \frac{3}{4} b_{xy} B_{2,1} \right] \\ &\times \left[ 2(s-3) + \frac{B_{1,2} s B_{2,1}}{8} \right] \sqrt{3} r B_{1,2} + \frac{3}{16} b_{xy}^2 B_{2,1} B_{3,1}. \end{aligned} \quad (206)$$

где  $B_{1,2} = \frac{E_{xy} b_{xy}}{1-\nu_{1,2}^2}$ ;  $s = B_{1,2} r \sqrt{3} + B_{1,3} \frac{b_{xy}}{8}$ ;

$$s = \frac{1}{2} \left( B_{1,2} r \sqrt{3} + B_{1,3} \frac{b_{xy}}{2} \right).$$

Коэффициент Пуассона в плоскости  $xy$  находится из соотношения:

$$\frac{s_{xy_3}}{E_{xy}} = \frac{F_{xy_3}}{E_{xy}}. \quad (207)$$

Из выражений (206), (207) следует, что на значение коэффициента Пуассона в плоскости  $xy$  существенное влияние оказывают параметры несущих слоев.

В работе [52] приводятся выражения для определения выраженных модулей сотовых заполнителей некоторых форм без учета работы несущих слоев. Рассмотрены следующие типы заполнителей: нормальный шестигранный (тип I); нормальный квадратный (тип II); усиленный дополнительной лентой шестигранный (тип III); усиленный дополнительной лентой квадратный (тип IV).

Модули сдвига заполнителя типа I равны:

a) в плоскости  $xz$

$$G_{xz_3} = 1,5 \frac{b_{xy}}{r \sqrt{3}} G_x; \quad (208)$$

b) в плоскости  $yz$

$$G_{yz_3} = \frac{b_{xy}}{r \sqrt{3}} G_y. \quad (209)$$

Модули сдвига заполнителей типа II равны в плоскостях  $xz$  и  $yz$

$$G_{xz_3} = G_{yz_3} = \frac{b_{xy}}{r} G_x. \quad (210)$$

Модули сдвига заполнителя типа III равны:

a) в плоскости  $xz$

$$G_{xz_3} = \frac{x}{2} \cdot \frac{b_{xy}}{r \sqrt{3}} G_x; \quad (211)$$

b) в плоскости  $yz$  жесткостью дополнительной ленты из плоскости  $xz$  можно пренебречь, тогда

$$G_{yz_3} = \frac{b_{xy}}{r \sqrt{3}} G_y. \quad (212)$$

Модули сдвига заполнителя типа IV:

a) в плоскости  $xz$

$$G_{xz_3} = (1 + \sqrt{2}) \frac{b_{xy}}{r} G_x; \quad (213)$$

b) в плоскости  $yz$

$$G_{yz_3} = \frac{b_{xy}}{r} G_y. \quad (214)$$

Сравнение выражений (203), (204), (208) и (209), можно сделать вывод, что значения модулей сдвига, определенные по формулам, полученным без учета энергии деформации несущих слоев, достаточно хорошо совпадают с более точными формулами, полученными в работе [5]. Следовательно, при практической расчетах можно использовать выражения (208)–(214).

Модуль сжатия сотового заполнителя в направлении нормали к срединной поверхности  $E_{xz}$  рассчитывается по формуле

$$E_{xz} = \frac{F_{xz0}}{F_{\text{пол}}}, E_x, \quad (215)$$

где  $F_{xz0}$  — площадь поперечного сечения ячеек  $cdefgh$  в плоскости  $xy$ ;

$F_{\text{пол}}$  — полная площадь поверхности трехслойной панели, занимаемая одной ячейкой (рис. 87).

Значения отношений  $\frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{рабн}}}$  для различных типов заполнителя приведены в табл. 36.

Таблица 36

Зависимость коэффициентов  $\frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{рабн}}}$  от параметров и типа заполнителя

Тип заполнителя			
Цилиндрический изогнутый	Квадратный изогнутый	Цилиндрический усиленный	Квадратный усиленный
$1,98 \frac{t_{\text{ст}}}{r}$	$4 \frac{t_{\text{ст}}}{r}$	$2,14 \frac{t_{\text{ст}}}{r}$	$5,4 \frac{t_{\text{ст}}}{r}$

При сжатии сотового заполнителя в направлении нормали к срединной поверхности разрушение сотов может быть двух типов: вследствие достижения предела прочности материала заполнителя и в результате превышения критических напряжений и потери устойчивости стяжками сотов.

Допускаемые напряжения в заполнителе, определяемые прочностью материала заполнителя при сжатии, могут быть найдены по формуле

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{рабн}}} \sigma_{\text{допн}}. \quad (216)$$

Однако, как показывает практика, предел прочности, установленный экспериментально, значительно ниже, чем предел прочности, вычисленный по формуле (216). Кроме того, экспериментальное значение предела прочности при сжатии существенно зависит от высоты заполнителя, что не отражено в формуле (216). Фактическая картина разрушения заполнителя при сжатии свидетельствует о том, что разрушение заполнителя происходит вследствие потери устойчивости стяжками сотов, а не вследствие достижения предельных допускаемых напряжений при сжатии (рис. 88). Поэтому для определения теоретических зна-

чений предела прочности при сжатии сотовых заполнителей следует исходить из весущей способности сотов.

Рассмотрим элемент заполнителя, показанный на рис. 89. Наиболее опасными являются участки стенок сотов  $ab$  и  $cd$ , так как толщина любой стяжки  $bc$  равна  $2\delta_{\text{ст}} + b_{\text{ст}}$ , а стенок  $ab$  и  $cd$

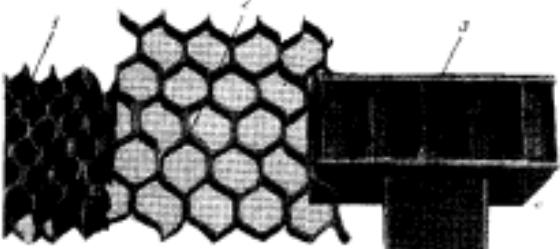


Рис. 88. Характер разрушения сотового заполнителя при сжатии в образцах без несущих слоев (1, 2) и с несущими слоями (3).

только  $b_{\text{ст}}$ , где  $b_{\text{ст}}$  — толщина одинарной стяжки, а  $\delta_{\text{ст}}$  — толщина калевой синтетической пленки. В некоторых работах указано, что с достаточной точностью, подтверждаемой экспериментом,

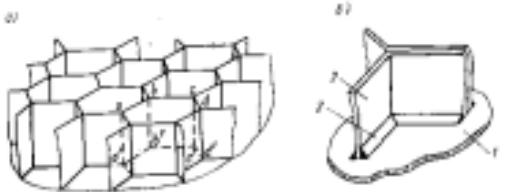


Рис. 89. Элемент сотового заполнителя (а) и схема сдавливания сотового заполнителя с несущими слоями (б).  
1 — несущие слои; 2 — стена сотов; 3 — хайл.

можно рассматривать стени  $ab$  как пластину, защищенную по краям  $a'b'$  и  $b'b$ . Вид закрепления краев  $ab$  и  $a'b'$  существенно зависит от характера нагружения и типа образца. В случае если образец сотова испытывается без несущих слоев, то края  $ab$  и  $a'b'$  следует рассматривать как сперты. При испытании образцов сотов с несущими слоями, присоединенными пайкой или сваркой, закрепка краев  $ab$  и  $a'b'$  считается защищенной. В случае если сотовы собраны с несущими слоями при помощи пленок

симметрических сеч., схема отрыва определяется характером нагружения. Это объясняется тем, что скользящим элементом между несущими слоями и стекой сотова является залник смолы (рис. 89, б). Смолу необходимо рассматривать как упруго-вязкое тело, характер деформации которого существенно зависит от времени и скорости нагружения. При больших скоростях нагружения будем считать, что смола является абсолютно упругим телом, а края  $a'b'$  и  $b'b$  защемлены. При малых скоростях нагружения смолу можно рассматривать как вязкое тело, причем сопротивление текучее зависит от скорости деформации. Следовательно, в этом случае характер закрепления залника смолы приближается к простому опиранию.

Критические напряжения сжатия в стеке  $a'b'b'$  могут быть определены по формуле

$$\sigma_{\text{кр.ст}} = k_1 \frac{E_s}{(M_{\text{ср}})^2}, \quad (217)$$

где  $b$  — размер короткой стороны пластиинки.

В случае если критическое напряжение, рассчитанное по формуле (217), лежит за пределом упругости, то вместо  $E_s$  нужно подставить значение эффективного модуля

$$E_{\text{эфф}} = \eta E_s, \quad (218)$$

Коэффициент  $\eta$  равен

$$\eta = \sqrt{\frac{c_1 + c_2 \frac{a^2}{b^2} + \frac{E_s}{E_s - 1/a^2}}{c_1 + a^2 b^2}}, \quad (219)$$

где  $a = \frac{b}{z}$  — размер сжатой стороны;

$a$  — размер несущей стороны;

$c_1 = 2,5$ ;

$c_2 = 5,0$ ,

$\eta$  — коэффициент пластичности пластиинки, у которой

$a \rightarrow 0$ .

Из [111] следует, что

$$\eta_z = (0,25E_s + 0,75E_s) \frac{1}{E_s}, \quad (220)$$

где  $E_s$  — переменный сокрушающий модуль;

$E_s$  — переменный касательный модуль в пластической области.

Коэффициент  $k_1$  определяется из графика (рис. 90), взятого из работы [111]. В случае свободного опирания кромок  $a'b'$  и  $b'b$  для определения коэффициента  $k_1$  следует пользоваться кривой 1, а при защемлении кромок  $a'b'$  и  $b'b$  — кривой 2.

При расчёте предела прочности на сжатие шестигранного сотового заполнителя, усиленного листовой лентой в плоскости склонения, в качестве расчетного, наиболее слабого элемента следует брать участок усиленительной прокладки. Это объясняется

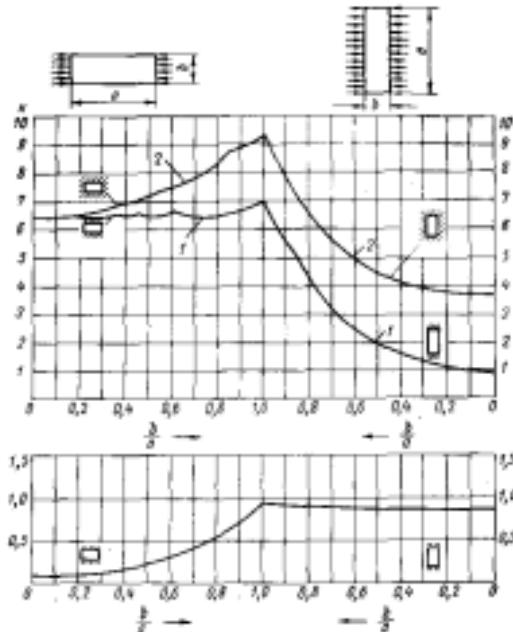


Рис. 90. Зависимость  $k$  от отношения размеров сечения к характеру опирания стекла при сжатии в плоскости стекла.

таким, что отношение ширины этого участка к высоте шансольтнее, в результате чего коэффициент  $k$  будет иметь наименьшее значение.

Значения критических напряжений, определяемые по формуле (217), отличаются от экспериментальных в 2–3 раза.

Таблица 37

Критические напряжения при сжатии некоторых типов сотовых стекловолокнистых

Тип наполнителя	$r, \text{мм}$	Высота стенки, $\text{мм}$	Критические напряжения, $\text{кг}/\text{см}^2$		Заданные значения
			расчетные	экспериментальные	
Сотоволаст из пены	6	12	0,04	250	2,6
	6	15	0,04	226	2,46
	6	16	0,04	213	2,22
	6	20	0,04	209	2,15
Стекловолокнистый (изогнутое ЭЛ-Ф, наполнитель — стекловолокнистая мицелий марка 3-008)	2,5	12	0,10	900	47,5
Стекловолокнистый (изогнутое — базальтовый лак «А», наполнитель — стекловолокнистая мицелий марка Т5)	14	12	0,54	815	48,7
	14	20	0,54	895	53,5
	14	40	0,54	895	53,5
То же с несущими скобами	16	12	0,54	1140	58,5
	14	20	0,54	1040	61,2
	14	40	0,54	900	54,0
					17,5

а коэффициент  $k_2$  определяется в зависимости от характера закрепления краев из графика рис. 91. При вычислении  $D_{cr}$  справедливы указания, сделанные при объяснении значений величин, входящих в формулу.

Определив критические напряжения стяжек сотов, необходимо найти предел прочности заполнителя при сжатии или сдвиге. Предел прочности заполнителя при сжатии

$$\sigma_{cr} = \sigma_{st, cr} \cdot \frac{F_{st, cr}}{F_{st, exp}} \quad (223)$$

Предел прочности заполнителя при сдвиге

$$\tau_{cr} = \tau_{st, cr} \cdot \frac{F_{st, cr}}{3F_{shear}} \quad (224)$$

### § 29. Особенности испытаний сотовых заполнителей и панелей с ними

В процессе проектирования трехслойных конструкций возникает необходимость производить испытания конструкции в целом и ее отдельных элементов. Первоначально определяют прочностные характеристики сотового заполнителя  $\sigma_{cr}$ ,  $\tau_{cr}$ , характеризующие изменения от параметров заполнителя и проверяют правильность расчета величин модулей сдвига и сжатия. Все

причем для металлических сотов в меньшую сторону, а для стеклопластиковых в большую.

В табл. 37 приведены расчетные и экспериментальные значения критических напряжений при сжатии некоторых типов сотовых стекловолокнистых.

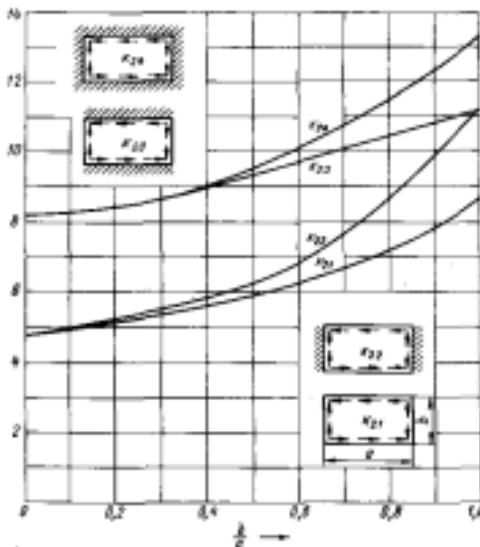


Рис. 91. Зависимость  $\sigma_{cr}$  от относительных размеров сотов и характера закрепления стяжек при сжатии.

При сдвиге без касательной нагрузки критические напряжения в заполнителе могут быть определены по формуле

$$\tau_{cr, exp} = k_3 \frac{\pi D_{cr}}{3h_{st}} \quad (225)$$

где изгибная жесткость пластины

$$D_{cr} = \frac{E_{st} h_{st}^3}{12(1-\mu_{st}^2)} \quad (226)$$

эти величины используются в расчетах конструкции в целом. Чтобы удостовериться в правильности расчетов конструкции, проводят целый ряд специальных испытаний, причем при испытании трехслойных конструкций применяются, в основном, те же методы, что и для обычных. Однако имеется ряд особенностей, о которых речь пойдет ниже.

Испытания несущих слоев проводятся согласно указаниям соответствующих ГОСТов и международных нормалей. В на-

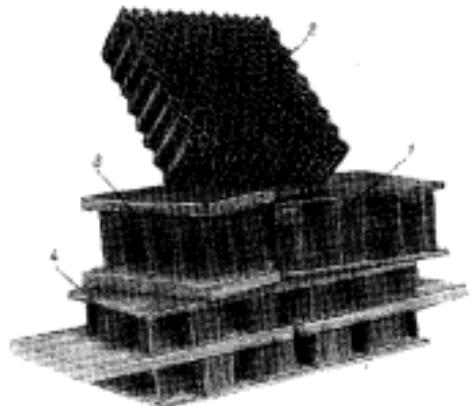


Рис. 92. Образцы потолиста.

1, 2 — для определения модуля и краевая прочность при сжатии с несущими слоями и без несущих слоев соответственно; 3 — для определения предела прочности при растяжении; 4 — для определения модуля и предела прочности при сдвиге.

стоящее время испытания практически всех примененных для изготовления несущих слоев материалов регламентированы соответствующими документами, но практически нет общесоюзного документа, который бы определил порядок и условия испытаний сотовых заполнителей. Испытания сотовых заполнителей производятся на основании соответствующей инструкции. Положения инструкции недостаточно полно отражают требования к испытаниям, не дают рекомендаций по форме применяемых для испытаний образцов. В результате испытания проводятся различными методами, на различных образцах, что дает порой несравнимые результаты.

Для определение характеристик сотового заполнителя проводят испытания на растяжение, сжатие и сдвиг. При испытаниях образцов сотовых заполнителей, изготовленных с применением высокополимерных материалов, необходимо нестабильную связь измеряемых параметров с помощью самонивелирующей аппаратуры.

Испытаниями на растяжение на образцах из материала сотового заполнителя определяют предел прочности при растяжении и модуль упругости, на образцах сотованелей с несущими слоями — характер разрушения сотованели и предел прочности на отрыв.

При определении прочности материала заполнителя образцы могут состоять из одной части одной ленты заполнителя, она должна быть гофрированной и включать не менее 3—4 гофров. Необходимо, чтобы длина образца обеспечивала закрепление ленты в специальных захватах и образование рабочей части образца для установки тензодатчиков или других измерительных приборов. Образцы стекловолокнами для определения характера разрушения и прочности на разрыв должны иметь несущие слои, жесткость которых обеспечивает равномерное распределение усилий по всему сечению.

Размер образцов в плане зависит от размера ячеек сотов. Поперечное сечение образца должно включать не менее 16 ячеек. Внешний вид образца показан на фотографии рис. 92. Нагружение образца должно обеспечивать бесмоментное центральное нагружение образцов, а измерительное устройство — замер удлинений во меньшей мере в двух крайних точках образца.

При испытаниях на сжатие используют квадратные в плане образцы сотового заполнителя с несущими слоями и без них. Высота заполнителя в образце равна высоте заполнителя в конструкции. Поперечное сечение образца включает 16 ячеек, но сторона квадрата должна быть не менее 100 мм или кратной 100

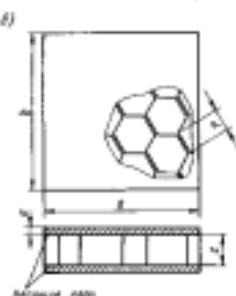
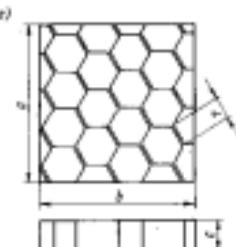


Рис. 93. Схема образца сотованеля для определения модуля в пределе прочности при сжатии: а — без несущих слоев; б — с несущими слоями.

(рис. 93). Жесткость же изгиб несущих слоев и конструкция за-жимных пластинах нагружного устройства должны быть таковы, чтобы обеспечить равномерное распределение усилий по сотовому пласту. Сближение несущих или наружных слоев измеряется во меньшей мере в двух противоположных точках образца.

Конструкция нагружного устройства и схема нагружения показаны на рис. 94.

Испытание на сдвиг наиболее целесообразно производить на модифицированных образцах, вид которых показан на рис. 95.

Схема нагружения образца, приведенная на рис. 95, обеспеч-

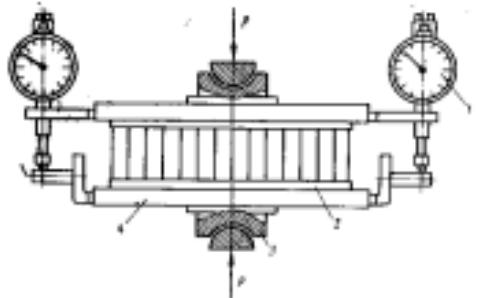


Рис. 94. Схема испытаний образца сотового пластика на сдвиг.  
1 — грузометр; 2 — образец; 3 — зажимные пластины; 4 — нижнее устройство.

чивает разрушение его от сдвигавших напряжений. В образцах, предлагаемых для испытания инструкцией, вследствие значительного трения в точках закрепления несущих пластин возникает сила, нормальная к средней поверхности образца и препятствующая сближению слоев вследствие сдвига. Эта сила создает моментную нагрузку, вызывающую отрыв несущих слоев от заполнителя, что существенно сказывается на результатах эксперимента.

Площадь поперечного сечения рабочей части образца должна включать не менее 16 плашек. Однако ширина образца должна быть не менее 100 мм. Высота рабочих участков заполнителя выбирается равной толщине заполнителя в конструкции. Изменение расстояния между внутренними пластинами образца при испытаниях измеряют обязательно с двух сторон. Нагружение образца следует проходить без кручения и изгиба.

В связи со специфической работы трехслойных конструкций имеется ряд особенностей измерений, производимых в процессе

испытаний, так, например, необходимо предусмотреть возможность замеров смещений слоев относительно друг друга вследствие сдвигов и сжатия в заполнителе. Такие измерения проводят в зонах, прилегающих к местам нагружения трехслойных конструкций локальными силами, нормальными и касательными к средней поверхности несущих слоев, также сосредоточенными моментами. Особо важное значение приобретают замеры в случае, когда силы приложены к образцу из несущих слоев. Вследствие того что абсолютные значения сдвига и сближения незначительны, а вызываемые ими напряжения могут привести к разрушению конструкций, чувствительность измерительных органов и их точность должны быть достаточно высоки.

### § 30. Конструктивное оформление соединений трехслойных пакетов

Одной из основных задач при проектировании трехслойных конструкций с легким заполнителем является конструктивное оформление соединений трехслойных элементов между собой и с другими элементами конструкции. Трудность заключается в том, что трехслойные конструкции гравитационно плоско работают при воздействии сосредоточенных нагрузок. Например, при попытке закрепить какую-либо соединительную деталь на трехслойной панели при помощи болта, пропущенного через панель, заполнитель будет снят при затяжке. Поэтому, как правило, в местах приложения сосредоточенных сил трехслойные панели устанавливаются. Однако вследствие того, что во многих случаях на несущих трехслойных пакетах и оболочках приходится размещать большое количество разнообразных элементов насыщенных, необходимость усилки всех мест крепления этих элементов приводит к неоправданному утяжелению и снижению весовой

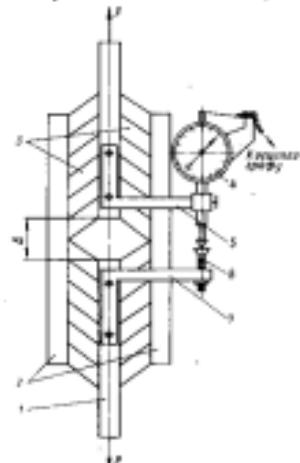


Рис. 95. Схема испытаний образца сотового пластика на сдвиг.

1 — модифицированный образец; 2 — зажимные пластины; 3 — нижнее устройство; 4 — стойки консольного устройства; 5 — регулирующие пластины; 6 — грузометры.

эффективности применения трехслойных конструкций. Следует veryska тщательно выбирать размеры подкрепляющих элементов и, если это возможно, устанавливать некоторые элементы на один несущий слой так, чтобы

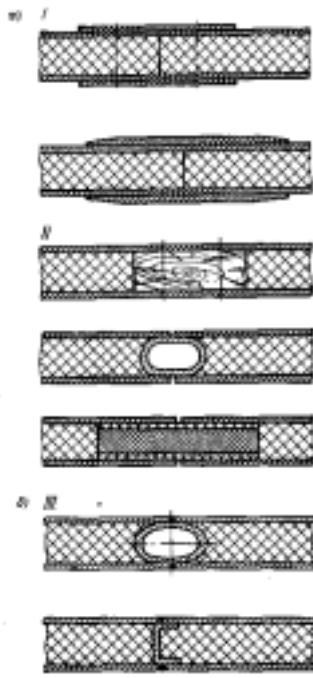


Рис. 96. Стыковые соединения трехслойных панелей: а — с наружными листами из пластмассы; б — с наружными листами из металла.

— с наружными листами из пластмассы, известного качества или же из металла; б — с наружными листами из металла; в — соединение с наружной обшивкой и скобами.

Трехслойные панели могут применяться в составе

настровок, рубок, переборок, что требует разработки узлов соединений их как между собой, так и с другими судовыми конструкциями.

Стыковые соединения трехслойных панелей между собой могут выполняться с накладками или помощью захватного элемента. Оформление соединения зависит от материала наружных слоев и требований, предъявляемых к конструкции (рис. 96).

Тавровые соединения трехслойных панелей выполняются с помощью приформованных уголников (рис. 97, а) или же в одной из панелей делается паз, куда вставляют соединяющие панели (рис. 97, б).

При соединении трехслойных переборок, стенок, настровок, рубок с крышей применяют угловые соединения. Конструктивное оформление таких соединений показано на рис. 98.

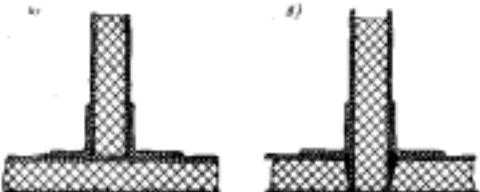


Рис. 97. Тавровые соединения трехслойных панелей между собой при помощи приформованных уголников из стеклопластика.

Соединение трехслойной панели с металлической переборкой может быть осуществлено при помощи:

- болта и накладок из стеклопластика (рис. 99, а);
- накладок из стеклопластика (рис. 99, б);
- приформованного уголника и накладки из стеклопластика (рис. 99, в);
- приформованного уголника (рис. 99, г);
- металлической пластины (рис. 99, д);
- металлического уголника (рис. 99, е).

Последнее соединение рекомендуется применять в конструкциях, находящихся в районах повышенной вибрации.

Угловые и тавровые соединения трехслойных панелей с металлическими судовыми конструкциями также часто встречаются в практике проектирования.

Соединение трехслойной панели с металлической палубой (подволокой) выполняется при помощи металлического ковша, как показано на рис. 100, а, трехслойной панели с настилом металлической палубы так, как показано на рис. 100, б,

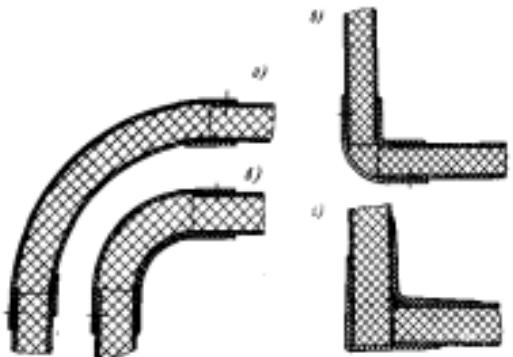


Рис. 98. Угловые соединения трехслойных панелей: а — при радиусе загибания более 200 мк; б — при радиусе загибания менее 200 мк; в — изгижение при помощи гнутой металлической полосы; г — изгижение при помощи утюжка из стеклопластика.

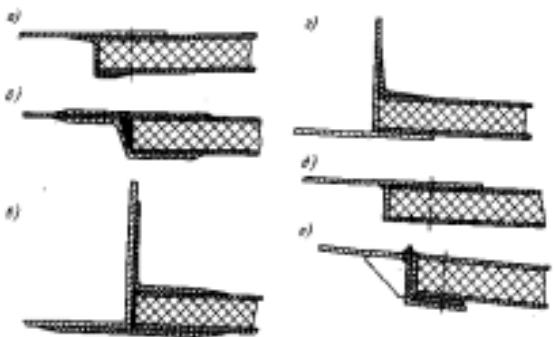


Рис. 99. Возможные варианты соединения трехслойных панелей с металлической ребристой заполнительной при помощи: а — болта и накладки из стеклопластика; б — накладки из стеклопластика; в — прессформового утюжка и накладки из стеклопластика; г — прессформочного утюжка; д — металлической панели (бутика); е — металлического утюжка.

в, г, д. Следует заметить, что соединение типа 100, д обладает повышенной вибростойкостью.

В практике эксплуатации трехслойных конструкций встречаются случаи, когда они нагружены только на один несущий слой. Это делается преднамеренно, или же происходит в результате соответствующего оформления различного рода соединений. При этом работа трехслойной конструкции несколько меняет

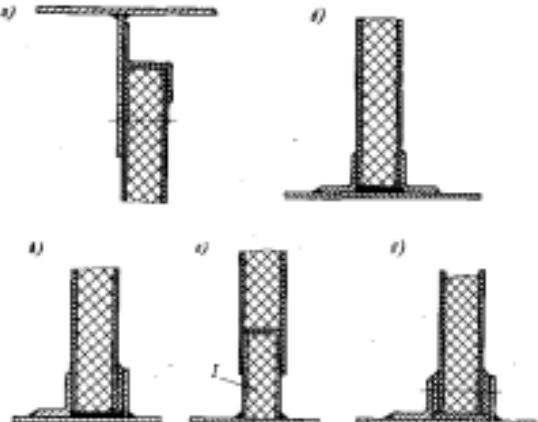


Рис. 100. Возможные варианты соединения трехслойной панели с металлической панелью, выкованным при помощи: а — металлического ковшака; б — металлического утюжка и утюжка из стеклопластика; в — металлическая полоса и утюжок; г — металлический сайдинг; д — металлические полосы и утюжок.

Г — после установки первоначально зачищается гранитоизвестковым напильником.

свой характер: второй слой включается в работу через заполнитель. Если нагрузка действует в плоскости средней поверхности панели, передача усилий с нагруженного слоя на несущий происходит сдвигом на протяжении некоторой зоны. Длина зоны перераспределения зависит от параметров несущих слоев и заполнителя. Напряжение сдвига в заполнителе в пределах зоны перераспределения изменяется по закону, близкому к экспоненциальному. В концах зоны перераспределения относительные удлинения несущих слоев равны. Если же нагрузка действует перпендикулярно средней поверхности в виде сосредоточенной силы, в заполнителе возникают значительные

сжимающиеся напряжения, которые затухают по мере удаления от точки приложения силы.

При несущих слоях разной толщины напряжения в нагруженном слое меньшей жесткости могут достичь такой величины, что происходит местное разрушение несущих слоев, в то время как панель в целом будет способна нести нагрузку.

При действии нагрузки, нормальной к несущим слоям и расположенной равномерно, наиболее опасные напряжения возникают в местах постиковки на один слой жестких подкреплений, относительные деформации которых значительно меньше, чем деформации панели или оболочки. В этом случае возникают значительные сдвиги в месте соединения несущего слоя с подкрепляющим элементом и напряжения отрыва в слое клея, соединяющего несущий слой и подкрепляющий элемент. Однако нагрузка из одних несущих слоев в определенных случаях будет весьма желательна, так как оно более выгодно в весовых отношениях.

При применении такого способа нагружения необходимо проводить расчет напряжений сдвига и сжатия в замонолите, а также напряжений в kleевых швах. Эти напряжения не должны превышать допустимые. В противном случае может произойти расслоение панели, сжатие замонолителя или отрыв усиливющего элемента.

## Глава VIII ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ЛЕГКИХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### § 31. Основные способы изготовления

Компактный способ — основной способ изготовления как из листов малых габаритов, так и армированых конструкций. При контактном способе производства в качестве оснастки применяются формы, очертания которых соответствуют конфигурации изготовленных судовых конструкций. На рабочую поверхность оснастки наносят разделительный слой. На образованную твердую сухую разделительную пленку наносят тонкий слой полизифирной смолы. После частичного отверждения декоративного слоя на последней укладывают слой стеклонаполнителя, пропитывают его смолой и тщательно прикатывают к оснастке при помощи ручных роликов. Затем укладывают следующий слой стеклонаполнителя, пропитывают и прикатывают и т. д. до получения необходимой толщины. Для снижения трудоемкости и сокращения времени изготовления конструкций из стеклопластика целесообразно применять предварительно пропитанную стекловолокнистую арматуру.

Одной из разновидностей контактного способа с частичной механизацией процесса является пакетный способ формирования. Он применяется при изготовлении плоских болотниц из стеклопластика толщиной 5—12 мм на основе смол ПН-3 и НПС-600-21М и стеклонаполнителей АСТТ(б)-С<sub>2</sub>О и ТЖС-0,6-О. При изготовлении болотниц пакетным способом трудоемкость уменьшается в 3—4 раза и исключается контакт рабочих со связующим.

Сущность способа заключается в следующем (рис. 101). На горизонтальную поверхность постели I укладывают необходимое количество слоев сухой стеклоткани [отклонение постели от горизонтального положения допускается не более  $\pm 3$  мм по ширине и длине]. Уложенную в пакет 5 стеклоткань опрессовывают эластичной диафрагмой. Материалом диафрагмы может служить полизамидная пленка. После опрессовки диафрагму снимают и натягивают дополнительный слой стеклоткани 3 над

пакетом и ограничителями толщиной 2, предварительно установленными на постели по контуру заготовляемого полотнища. Нагнетаемое фиксируется рейками, толщина которых должна быть раза в два толщину пакета. В центральную часть пакета из специального бака 6 наливают связующее 4. Количество связующего определяется по формуле

$$P_{\text{св}} = P_{\text{ст}} \left( \frac{\alpha_{\text{ст}}}{\alpha_{\text{св}}} + \frac{a}{2d_1} + 0,1 \right), \quad (225)$$

где  $P_{\text{ст}}$  — вес стеклоткани в пакете, кг;

$\alpha_{\text{ст}}, \alpha_{\text{св}}$  — зеркальное содержание соответственно связующего и стеклоткани в стеклопластике, %;

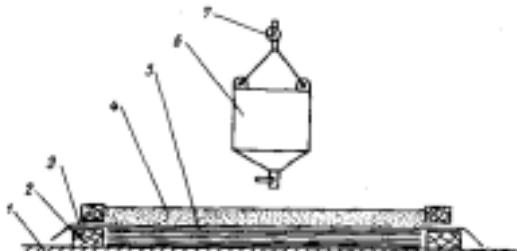


Рис. 101. Принципиальная схема изготовления стеклопластика пакетным способом.

$a$  — отклонение плоскости постели от горизонтального положения, мм;

$d$  — толщина формируемого полотнища, мм;

$b$  — коэффициент, учитывающий коррекцию пакета ( $b=0,68$ ;  $b=0,66$ ;  $b=0,62$ ;  $b=0,59$  при процентном содержании стеклонаполнителя в пакете 48, 51, 54, 56% соответственно).

Последний член в выражении (225) учитывает отходы смолы при изготовлении стеклопластика. Проникновение связующего в стеклонаполнитель происходит с поверхности пакета под действием капиллярных и гравитационных сил. Связующее заливается в пакет из бака. Контроль за расходом связующего при наливе осуществляется по джманометру 7. После пронитки и полимеризации пакет дополнительный слой стеклоткани вместе с оставшимся связующим удаляют.

Способ напыления — механизированный способ изготовления изделий и конструкций из стеклопластика, к прочности которых предъявляются несколько пониженные требования.

Сущность способа заключается в том, что с помощью специальной установки одновременно наносят связующее и стеклополимеризант на специальные формы. В качестве стеклополимеризанта используется смола, которая располагается в заглушках на барабане и поддается роликами к режущему устройству. Разрезанное стекловолокно забирается потоком воздуха и выбрасывается из формы. Связующее готовится в виде двух композиций (смолы с ингибиторами и смолы с ускорителем). По выходе из сопла пульверизатора эти композиции соединяются (рис. 102).

Процесс изготовления изделий методом напыления состоит из:

- подготовку стеклополимеристых материалов и связующего;
- подготовки оснастки, оборудования и инструмента;

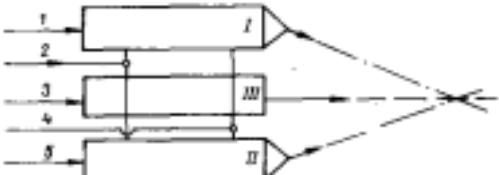


Рис. 102. Принципиальная схема пульверизатора для напыления.

I — смоло-упрочнитель; II — смола для смеси пульверизатора; III — смоло-упрочнитель; 1 — смола-упрочнитель; 2 — смола; 3 — смоло-упрочнитель; 4 — смола-упрочнитель; 5 — смола; 6 — смоло-упрочнитель; 7 — сопло.

- нанесение разделительного и декоративного слоев;
- формование — выпыление;
- выдержки и снятие изделий с оснастки.

Напылительные установки, являющиеся основами оборудования для изготовления стеклопластика напылением, имеют в своем составе три главные системы: приготовления связующего, измельчения стекловолокна и распыления.

Метод нашел достаточно широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом. Его применение позволяет механизировать процесс укладки стекловолокнистых материалов, работу по нанесению связующего, поскольку удается нанести стеклопластики за счет неподъемания жгутового стекла вместо тканых материалов. Но есть у этого метода и отрицательные стороны: происходит некоторая потеря прочности, не гарантируется разночлененная толщина изделия конструкции и, кроме того, приходится капсулировать процесс заполнения, так как в противном случае происходит резкое повышение загрязненности воздуха зернистыми летучими и стеклянной пылью.

Способ формования с применением эластичной мембранны (рис. 103) применяется при изготовлении изделий сложной конфигурации и с целью улучшения прочностных характеристик стеклопластика. На внутреннюю поверхность матрицы 3 укладывают необходимое количество стеклонаполнителя 5, пропитанного связующим. Затем с помощью уплотняющих зажимов 1 к матрице прикрепляют мембранны 4, которая закреплена на раме. Материалом мембранны может служить в полизиэтиленовая пленка. Из пространства между стеклой формы и мембранны откачивают воздух по каналам 2. После достижения достаточной степени вакуума (600—700 мм рт. ст.) давление атмосферного воздуха прижимает мембранны, отформовывая конструкцию на матрице.

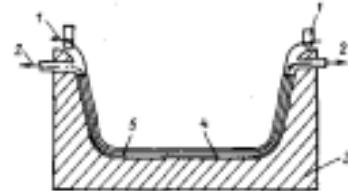


Рис. 103. Схема формования с применением эластичной мембранны.

дить последнюю укладку стеклоткани. Прониты тканы ведут как жаждыми полифибринными скотчами, так и сухими. Последние необходимо предварительно растворять в ацетоне или другом растворителе.

Конструкции, изготовленные этим способом, имеют поверхность хорошего качества. Прочность стеклопластика по сравнению с получаемым контактным способом повышается, улучшаются условия труда и увеличивается производительность. При этом, одновременно, увеличивается и стоимость изготовления из-за необходимости иметь сложное дорогостоящее оборудование.

Вакуумный способ применяется при изготовлении небольших конструкций монолитно с набором или гладкими поверхностями. Он позволяет механизировать операцию пропитки стеклонаполнителей связующим. Сущность способа состоит в том, что пропитка стеклонаполнителей связующим происходит в результате разряжения в полости между двумя формами. Необходимые зажимы для уплотнения пакета создаются путем обжатия форм.

На рис. 104 представлена принципиальная схема процесса изготовления изделий из стеклопластика вакуумным способом. На форму 3, соответствующую наружным обводам изготавливаемо-

го изделия, укладывается пакет стеклонаполнителя 2 (стеклоткань, рубленое полотно, стеклозолот и т. д.), снаружи пакета устанавливается форма 1, внешняя рабочая поверхность которой соответствует внутренним обводам изготавливаемого изделия. В пакет основания 4 закреплены зажимы 5; пакет 7 надевается на него и через ловушку 6 соединяется с вакуум-насосом 8. Назначение ловушки — исключить возможность попадания связующего в вакуум-насос. Герметизация пространства между шаблонами достигается путем обжатия фланцев, которые прижимаются к плите основания при помощи жесткой рамки 9 и прижимов 10.

При изготовлении стеклопластика вакуумным способом прочностные характеристики его несколько повышаются, но применять этот способ целесообразно лишь при массовом производстве.

Изготавливаемые конструкции из готовых листов, профилей, трехслойных панелей, конструкции переборок и надстроек, имеющих небольшую погибь, могут изготавливаться из готовых листов стеклопластика холодного и горячего отверждения, а также из трехслойных панелей с различными наполнителями (гипопласт, сотовалст и др.). Процесс изготовления заключается в сборке конструкций из отдельных листов и панелей соответствующих габаритов и последующего их соединения.

В настоящее время основным способом изготовления конструкций из стеклопластика холодного отверждения является контактный. Этот способ довольно трудно поддается механизации, особенно в случае изготовления конструкций с поверхностью, имеющими значительные погибы. При изготовлении плоских конструкций или конструкций, имеющих небольшие погибы, можно применять вакуумный способ, позволяющий механизировать процесс и исключающий контакт рабочих со связующим.

При изготовлении пластмассовых конструкций цементением происходит некоторое снижение физико-механических свойств стеклопластика, затрудняется контроль толщины изделия в процессе изготовления (что особенно важно при изготовлении тонкостенных конструкций), повышается содержание вредных летучих веществ в окружающем воздухе. Кроме того, наличие операции пропитки несколько снижает эффективность этого способа.

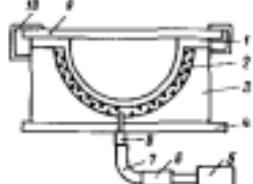


Рис. 104. Схема изготовления стеклопластика вакуумным способом.

Вакуумный способ требует сложного оборудования, но повышает прочностные характеристики материала. Этим способом можно получать лишь небольшой ассортимент изделий несложной конфигурации.

Вакуумным способом с применением эластичной мембраны, покрывающей производить обкатку по всей площади изделия, целесообразно изготавливать конструкции из изделия сложной конфигурации (типа ребер набора).

### § 32. Технология изготовления

**Выбор оснастки.** Рабочие поверхности постелей и матриц (балок) для изготовления пластиковых надстроек, рубок, лестниц переборок и выгородок с малой кривизной могут быть выполнены из следующих материалов: стеклопластика, фанеры, дерева, гипса, цемента, металлов.

При изготовлении судовых конструкций, имеющих сложную кривизну, рабочие поверхности постелей и матриц (балок) рекомендуется выпиливать из гипса или стеклопластика.

При выборе материалов для изготовления форм необходимо иметь в виду следующее:

- трудоемкость изготовления рабочих поверхностей форм (постелей, матриц, балок) из стеклопластика, досок и гипса значительно выше, чем при использовании фанеры или железобетона, а поэтому стеклопластик, доски и гипс целесообразно применять лишь при изготовлении большой партии однотипных конструкций;

- из всех перечисленных материалов менее стойким к механическим повреждениям является гипс.

Кроме того, выбор того или иного материала для выполнения рабочих поверхностей определяется в количеством изготавливаемых на этой оснастке изделий, а также их размерами и сложностью конфигурации. При изготовлении больших серий или конструкций сложной конфигурации следует применять стеклопластик или металлы. Для изготовления простых конструкций и в небольших количествах (1–5 шт.) используется дерево (доски, фанера) или гипс.

Формы для обеспечения съемки (выемки) готовой пластиковой конструкции сложной конфигурации и больших размеров желательно делать разъемными. Линии разъемов целесообразно совмещать с участками изготовленной конструкции, которые наиболее трудно поддаются съемке (выемке), или с местами расположения вырезов (двери, люкомоторы, люки). Секции форм соединяются с помощью болтов, устанавливаемых на соединительных фланцах, или металлическими бандажами. Жесткость форм и постелей в зависимости от их размеров обеспечивается установкой ребер жесткости, металлическими или деревянными каркасами.

**Методы изготавления.** Конструкции надстроек и переборки в зависимости от габаритных размеров и сложности конфигурации могут изготавливаться как монолитными, так и из секций. При изготовлении монолитных конструкций общиков неизбежны сборочные работы, улучшается внешний вид, снижается трудоемкость изготовления.

Изготовление надстроек и переборок из секций расширяет фронт работ, улучшает условия труда и качество изготовления, однако требует дополнительных затрат на оснастку и приспособления, а также несколько снижает прочность конструкций.

При изготовлении надстроек и переборок из секций необходимо соблюдать следующие условия:

- размеры секций следует выбирать максимальными с целью сокращения количества стыков и пазов;

- стыки секций надстроек и переборок не должны совпадать со стыками корпуса судна, если последний выполнен также из стеклопластика.

**Подготовительные работы перед формированием конструкций.** Перед началом формования изделий из стеклопластика необходимо проверить и подготовить оснастку. Проверка рабочих поверхностей форм, постелей и подготовка их к формированию заключается в следующем: размеры и обводы рабочих поверхностей перед насыщением из них разделительного слоя проверяются в соответствии с чертежами и называниями данными и в случае отклонения исправляются. Рабочие поверхности тщательно очищаются от мыла, грязи и остатков разделительного слоя. В случае множества повреждений поверхности шлифуются, зачищаются и закрашиваются, затем наносится разделительный слой. В качестве разделительного слоя применяется 10-процентный раствор воска в бензине или 10-процентный раствор полизинилового спирта в воде. Нанесение разделительного слоя на рабочую поверхность оснастки может быть произведено с помощью аистки или пульверизатора.

Раскрой стеклоткани для изготавливания надстроек и переборок рационально производить по месту. При изготовлениимелких деталей производится предварительный раскрой стеклоткани по картам раскроя. При раскрое учитываются припуски по контуру полотнища и припуски для перекрытия пазов и стыков слоев стеклоткани. Толщина стеклопластика обуславливается необходимое количество слоев стеклоткани с учетом ее марки.

**Схема технологического процесса изготавления.** Схематически весь процесс изготовления надстроек (рубок) может быть представлен состоящим из семи укрупненных этапов (табл. 38).

При изготовлении стеклопластика методом контактного формирования на основе стеклоткани и поликарбонатной смолы весовое соотношение между связующим (смола, инициатор и ускоритель) и стеклополимером наиболее часто принимается 1:1.

Таблица 28  
Этапы технологического процесса изготовления пластмассовых  
надстроек, рубок, переборок

№ этапа	Итоги технологического процесса изготовления	Содержание этапа
	Подготовительный	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Подготовка формы (матрицы, баллонов) и формование</li> <li>2. Применение связующего и декоративного связующего</li> <li>3. Раскрай стеклоткани или подготовка стеклопаркирующего материала</li> <li>4. Нанесение радиационного слоя на форму (матрику, баллон)</li> </ol>
II	Формование обшивки надстроек (рубок)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Укладка стеклопаркирующего материала.</li> <li>2. Прострека стеклопаркирующего материала</li> <li>3. Примакта ван укладка заранее приготовленного стеклопаркирующего материала</li> </ol>
III	Формование ребер жесткости и установка их на обшивку	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Формование ребер жесткости (то же, что и в этапе II — 1, 2, 3)</li> <li>2. Предварительная установка ребер жесткости на фиксаторах</li> <li>3. Подготовка материала для приварки</li> <li>4. Приварка ребер жесткости</li> </ol>
IV	Сборка салонов	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Стикировка форм (матрицы, баллонов)</li> <li>2. Подготовка материала для соединительных элементов</li> <li>3. Соединение</li> </ol>
V	Внедрка (при необходимости — термообработка)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Создание необходимого результирующей края (или термообработка)</li> </ol>
VI	Изменение конструкции из форм (или же съем с баллонов)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Подготовка соответствующих приспособлений</li> <li>2. Непосредственное изменение конструкции</li> </ol>
VII	Домедление конструкции до товарного вида	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Механическая обработка</li> <li>2. Исправление дефектов</li> <li>3. Установка предметов крепления</li> <li>4. Окраска</li> </ol>

Существующее на основе полизифирных смол любых марок следует приготавливать небольшими порциями. Введение отверждающих добавок в смолу производится обязательно раздельно и лишь после тщательного перемешивания предыдущей добавки. Для получения декоративного слоя стеклопластика применяются пигменты, которые вводят в смолу.

При изготовлении стеклопластика методом контактного формования пропитки стеклонаполнителя связующим производится жесткой горячей кистью путем равномерного пропитывания от центра изделия к краям до полной пропитки всей поверхности.

Пропитанную стеклоткань покрывают слоем сухой ткани, прослаживают кистью без связующего и прикатывают специальными металлическими роликами. Затем на стеклоткань дополнительно наносят связующее до полной пропитки ее и укладываются последующий слой ткани.

Необходимым условием качественного изготовления изделий из стеклопластика является тщательная пропитка и полное удаление пузырьков воздуха из-под слоев ткани в процессе изготовления.

Процесс изготовления конструкции нужно рассчитывать во времени так, чтобы вся поверхность стеклопластика перед укладкой следующего слоя стеклоткани оставалась липкой (верхний слой не должен заполимеризоваться).

При изготовлении изделий небольших габаритов (площадью до 10 м<sup>2</sup>) нельзя формовать за один прием стеклопластик толщиной более 8 мм, так как формование заканчивается до момента гелеобразования связующего и по всей толщине материала одновременно происходит полимеризация с выделением большого количества тепла. При этом возникают деформации, которые могут привести к расслоениям.

Для обеспечения хорошего качества стеклопластика в этом случае необходим технологический зерхрев из 2—3 часа с тем, чтобы верхний слой стеклоткани перед укладкой связующего слоя продолжал оставаться липким.

Раскрайованная стеклоткань укладывается в постель (матрицу) внахлестку с перекрытием на 30—40 мм или без перекрытия с обязательной разгонкой стыков в каждом слое так, чтобы их сопряжение происходило через 5 слоев и более.

Особенности изготавливаемых балок-профилей. Набор, подкрепляющий стены и палубы надстроек и переборок, может выполняться как в процессе изготовления обшивок, настилов и переборок, так и отдельно. При изготовлении набора вместе с обшивкой целесообразно звенья менять П-образные и коробчатые профили. В этом случае на готовую обшивку в местах расположения балок-профильей устанавливают заранее заготовленные оформители из пенопласта и стеклопластика, представляющие собой внутренний стержень набора; затем формуют остальную

часть обшивки так, чтобы ее слои плотно облегали оформители и образовывали балки набора вместе с остальной частью обшивки.

Раздельное изготовление балок таивового, коробчатого в П-образного профилей производится согласно схемам, приведенным на рис. 105, после чего готовые балки устанавливаются в конструкции. При изготовлении балок выполняются следующие операции:

- проверка и подготовка матрицы и ее рабочей поверхности;
- раскрой стеклоткани и подготовка связующего;
- укладка, пропитка и прятка слоев стеклонаполнителя;
- выдержка (в случае необходимости с прижимом) в течение 5—7 суток.

При раскрое стеклоткани для изготовления профилей необходимо учитывать ее растяжение, поэтому следует брать размеры листов на 3—5% меньше, чем указано в карте раскроя.

**Принципиальные схемы** изготовления трехслойных панелей. Технологический процесс изготовления клеенных панелей с заполнителями из листового пенопластика и сотопластика состоит из следующих основных операций:

- заготовка элементов панелей (наружных обшивок, заполнителя);
- подготовка склеиваемых поверхностей;
- пропитывание и нанесение клея;
- сборки и склеивания панелей;
- механической обработки панелей после склеивания;
- контроля качества изготовления.

Принципиальные схемы изготовления трехслойных панелей с пенопластовыми и сотопластовыми заполнителями приведены на рис. 106, 107. Процесс заготовки элементов панелей состоит в их раскрое до нужных размеров. Резку стеклонаполнителя выполняют пневматическим инструментом, резку слоистого пла-

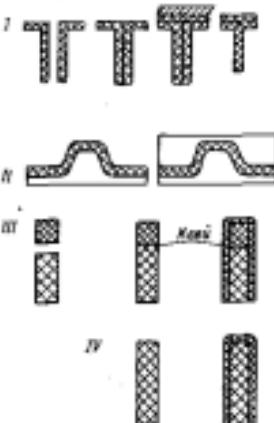


Рис. 106. Последовательность изго-  
тавления базы набора.

I — закореный профиль; II — коробчатый профиль; III — П-образный профиль; IV — П-образный профиль с термопечаткой из пенопластика.

- заготовка элементов панелей (наружных обшивок, за-  
полнителя);
- подготовка склеиваемых поверхностей;
- пропитывание и нанесение клея;
- сборки и склеивания панелей;
- механической обработки панелей после склеивания;
- контроля качества изготовления.

Принципиальные схемы изготовления трехслойных панелей с пенопластовыми и сотопластовыми заполнителями приведены на рис. 106, 107. Процесс заготовки элементов панелей состоит в их раскрое до нужных размеров. Резку стеклонаполнителя выполняют пневматическим инструментом, резку слоистого пла-

стника — на стандартном деревообрабатывающем оборудовании, подготовку сотопластика и сотопластика следует производить также на деревообрабатывающем оборудовании согласно РТМ 373—01 (РТМ — 745).

Подготовка поверхности материала под склеивание включает шерохование, очистку от пыли, обезжиривание. Шерохование пластиков напоминает за существующую деревообрабатывающим оборудованием. Обезжиривание подвергаются наружные обшивки из стеклонаполнителя, слоистого пластика. Для этих целей следует применять бензин, уайт-спирит, ацетон.

Для приклеивания пенопласта к сотопласту и наружным слоям из стеклонаполнителя используют клей ЭП-1 и К-153, а для склеивания пенопластика к слоистому пластику наряду с указанными марками можно применять клей ВИАМБ-3. Процесс изготовления панели включает в себя подготовку ее элементов и создание необходимых технологических условий для склеивания (давление, температура, оптимальная выдержка под давлением). При склеивании пенопласта и сотопластика с наружными слоями клеем ЭП-1, К-153 давление должно быть в пределах 0,5—1,00 кг/см<sup>2</sup>, а при склеивании пенопластика со слоистым пластиком клеем ВИАМБ-3 давление доводится до 2—3 кг/см<sup>2</sup>. Давление можно создавать любым из существующих способов: прессами (пневматическими или гидравлическими), методом вакуумного и вакуумно-прессования.

Панель может подвергаться механической обработке только через 10—15 суток (в зависимости от примененного клея) с момента склеивания.

Готовые панели осматривают и проверяют. Контроль подлежат геометрические размеры панелей, внешний вид и качество склеивания.

Технологический процесс изготовления панелей с пенопластами ФК-20 и на основе пенополиуретанов включает следующие основные операции:

- подготовку форм или контура (геометрической оснастки);
- подготовку наружных слоев и полуфабрикатов заполнителя;
- заполнение формы полуфабрикатом и подготовку к термообработке;
- термическую обработку панели в форме;
- извлечение панелей из формы и контроль качества изго-  
твления.

Сущность беспресского метода получения пенопласта заключается в том, что поликапроатильтеретьбутиловый эфир образуется в полости изделия путем всепенивания под влиянием термообработки исходной композиции. При этом всепенивание происходит либо в ре-  
зультате действия специального газогенератора, содержаще-

тоси в композиции (в случае применения пенополисте ФК-20), либо вследствие химической реакции между отдельными компонентами исходной композиции (в случае применения пенополиуретанов).

Подготовка формы состоит в прокроике ее в собранном виде по размерам, очистке поверхности от шлака, сизаке поверхностей антиадгезионным составом. При конструировании форм необходимо иметь в виду, что в процессе эксплуатации давление внутри формы достигает 2–3 атм.

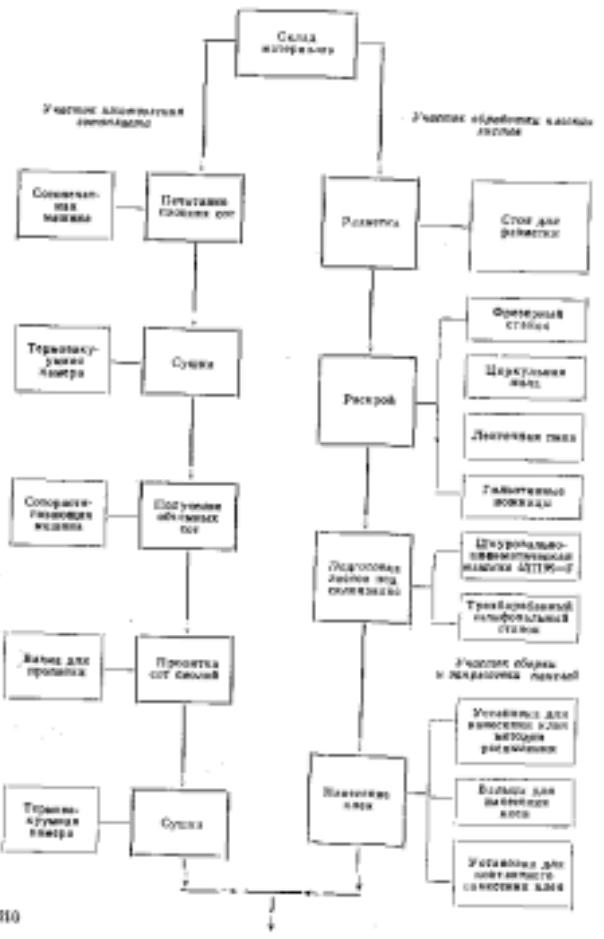
При изготовлении панелей с пенополисте ФК-20 в качестве наружных обшивок применяется металла. В случае наличия окантовки из металлических листов поверхность их подвергается очистке химическим способом. Обезжиривание производится бензином, ацетоном или уайт-спиритом. Для увеличения адгезии пенополисте ФК-20 с металлическими листами на последние наносятся клей БФ-2.

Подготовка полуфабриката заполнителя ФК-20 включает размельчение материала и вовешивание необходимого количества. Подготовка реакционной смеси на основе пенополиуретана состоит из тщательного смешивания и точного дозирования отдельных компонентов (полиизиуретана, поликапроиниата, волокнистого катализатора). Заполнение формы



Рис. 106. Принципиальная схема изготовления трехслойных панелей с заполнителем из пенополисте.





невинилуретаном осуществляется механическим способом из специальной установки, а полуфабрикат ФК-20 разномерно засыпают в форму так, чтобы не было кустов. После этого форму герметично закрывают.

Режим термобрибетки зависит от размеров изготовленной пакетки и в первую очередь от ее толщины. После того как вспенившийся заполнитель складывается, пакеты извлекают из форм, зачищают от наплывов пенопласта и подвергают внешнему осмотру и контролю.

Коробчатые пакеты представляют собой цельнопрессованную конструкцию из стеклоцеллюлозы, состоящую из наружных пакетах листов (золотниц) определенной толщины и внутренних гофрированных перемычек, которые образуются при прессовании пакета и представляют с наружными листами одно целое. Изготовление коробчатых пакетов производится механическим способом на следующей установке как из жидких, так и из сухих смол типа фенолипидов и полизифирных. На установке выполняются последовательно и беспрерывно следующие операции:

- образование пакетов стеклоформирующего материала (для пакета для зарумяных слоев и один пакет для внутренних перемычек);

Рис. 107. Принципиальная схема изготовления трехслойных пакетов с герметиком из силикона.

- пропитка образованных пакетов связующим (в случае применения жидких смол);
  - формирование из среднего пакета внутренней гофрированной части панели;
  - прессование пакета в полимеризацию связующего;
  - обрезка продольных кромок;
  - повертельный раскрой по длине.
- Технологические режимы изготовления коробчатых панелей зависят от применяемых материалов.

### § 33. Монтажно-сборочные работы

К монтажно-сборочным работам относятся: установка на борта, сборка секций, подготовительные работы, установка деталей крепления пасынчения, установка задстроек и переборок на судне. Все указанные работы в основном сводятся к выполнению различного рода соединений.

Соединение элементов пластмассовых конструкций между собой и с конструкциями из других материалов выполняются различными способами в зависимости от рода соединяемых материалов и требований к соединению (см. гл. IV).

Все виды соединений можно разделить на стыковые, угловые и тяговые. Стыковые и нахлесточные механические соединения выполняются по общепринятой технологии. С целью предохранения пластмассовых конструкций от возможных повреждений (смятия) и распределения усилий затяжки на большую часть необходимо установка металлических прокладок (шайб) под головки болтов (заклепок). Стыковые kleевые соединения выполняются либо нахлестку, либо путем установки заранее изготовленных пакетов. Стыковые формованные соединения выполняются с помощью односторонних армировочных пакетов.

Угловые и тяговые соединения так же, как и стыковые, выполняются различными способами: из заклепок, болтах, шпилек, кляе, проформовочных пакетах.

Для kleевых соединений применяются клей ЭП-1 и К-153, технология приготовления и применения которых приведена в РС-170-64 «Клей для судостроения, марки, свойства и назначение».

Проформовочные пакеты и угольники в формованных соединениях следует выполнять из тех же материалов, какие используются при изготовлении конструкций из стеклопластика.

Порядок выполнения стыкового формовочного соединения (рис. 108) пластмассовых конструкций между собой и с конструкциями из других материалов следующий:

- оконтуровывают и подгоняют кромки соединяемых листов;

- зачищают поверхность листов в районе приформовки пакетов щадящим кругом, очищают их от пыли, грязи и обезжиривают;
- раскрашивают стеклоткань для пакетов и приготавливают связующее;
- последовательно укладывают на стык соединяемых кромок пропитанную связующим стеклоткань до получения пакетов нужной толщины;
- выдерживают соединения конструкции для полимеризации связующего в течение двух суток.

При выполнении стыкового kleевого соединения после операции подгонки и зачистки необходимо нанести на обе склеен-

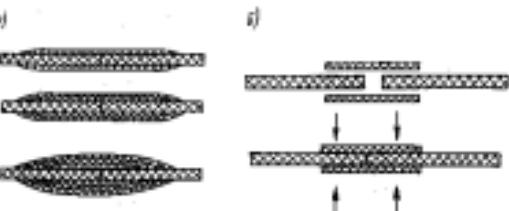


Рис. 108. Выполнение стыковых соединений: а — с помощью трифор-мации пакетов; б — с помощью триплексных пакетов.

заемные поверхности kleевой состава и пружинить их друг к другу. Удельное давление прижима при склеивании должно быть не менее  $0,2 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Продолжительность выдержки под давлением при температуре 15–20°C не менее 24 час., расход клея 0,5–0,6  $\text{kg}/\text{м}^2$ .

Тяговое (угловое) формованное соединение пластмассовых конструкций между собой с конструкциями из других материалов выполняется в следующем порядке (рис. 109):

- оконтуровывают, подгоняют и присоединяют кромки соединяемых конструкций;
- зачищают поверхности конструкций в районе приформовки угольников щадящим кругом, очищают от пыли, грязи, обезжиривают;
- раскрашивают стеклоткань для приформовочных угольников и приготавливают связующее;
- устанавливают соединяемые детали под требуемым углом и закрепляют с помощью деревянных брусков;
- прокладывают в углы пропитанный связующим стеклоткань;

— последовательно промазывают склеивающим, укладывают и прикатывают стеклоткань уголника до получения трубчатой толщины сначала с одной стороны стекла, затем с другой.

Изготовление уголников можно производить путем укладки заранее пропитанных и прикатанных слоев стеклоткани (пакетов). При этом количество слоев одновременно укладываемой стеклоткани (а пакет) не должно превышать двух-трех.

Соединение отдельных секций, а также крепление подстоеек и переборок к конструкциям основного корпуса осуществляется теми же способами, что и соединение отдельных элементов конструкций.

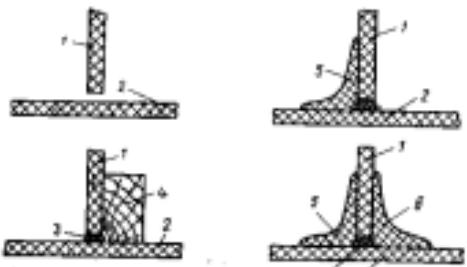


Рис. 109. Последовательность выполнения гибких (мягких угловых) соединений.  
1, 2 — склеиваемые детали; 3 — стеклоткань, пропитанная склеиванием; 4 — фиксатор; 5 — уголник.

Съем готовых конструкций с оснастки. При извлечении готовых конструкций из матриц и съеме их с болванок необходимо учитывать, что небольшие толщины обшивки подстоеек при значительных площадях их поверхности создают возможность повреждения конструкций (особенно монолитных).

В целях обеспечения качественного выполнения указанных работ и предупреждения повреждений следует:

- следить за качественным нанесением разделительного слоя на оснастку;
- матрицы в болваны при сложных обводах и значительных габаритах изготавливать из отдельных секций;
- для создания необходимой жесткости конструкции набор по возможности устанавливать до съема с оснастки;
- при значительных габаритах и весе конструкций устанавливать рамы для возможности использования подъемных устройств (рис. 110, а);

— для отделения конструкции от разделительного слоя использовать воздухом или горячей водой, подогреваемыми в зазор между матрицей и изготавляемой конструкцией, как показано на рис. 110, б.

Установка деталей насыщения. При установке деталей насыщения в надстройках и переборках клеевым способом соблюдается следующий порядок выполнения операций технологического процесса:

- размечают места установки деталей насыщения;
- зачищают места установки деталей насыщения и сами детали, очищают их от пыли и обезжиривают безвоздушном «Каплом» или акетоном;
- на подготовленные 1) поверхности вносят по возможности тонким и ровным слоем клеевой состав;
- устанавливают детали насыщения на размеченные места и плотно прижимают специальными приспособлениями или зажимами для обеспечения равномерного давления по всей поверхности склейки до  $2 \text{ кН}/\text{см}^2$ ;
- поддерживают под давлением в течение 24 час. (баржи полимеризации клеевого состава).

Металлические детали насыщения зачищают от окислов и ржавчины. Зачистку можно производить механическим способом (пневматическими машинками, пескоструйными и дробеструйными аппаратами) и химическим трапелем в 15-процентном растворе серной кислоты или 20-процентном растворе соляной кислоты при  $20^\circ\text{C}$  в течение 20–30 мин.

При креплении деталей насыщения праформовкой после операции разметки и зачистки следуют:

- раскрыть стеклоткань для праформовочных уголников или вкладок;
- приготовить связующее;
- нанести на подготовленную поверхность связующее, установить детали насыщения и прикатать их к приклеиваемым поверхностям;
- праформовать детали насыщения с помощью праформочных вкладок или уголников.

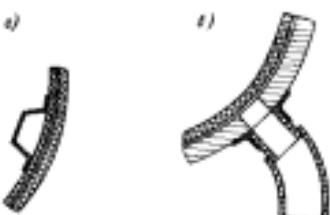


Рис. 110. Приспособления для выемки круглогабаритных конструкций из матриц (детей с болванами): а — рамы для извлечения подъемных устройств; б — приспособление для извлечения втулки (болта).

В случае установки металлических деталей насыщения два первых слоя стеклоткани приформовочных закладок к угольнику следует пропитать связующим на основе эпоксидного компаунда, а остальные — связующим на основе полизифирной смолы. При установке пластмассовых деталей насыщения приформовка выполняется на полизифирной смоле.

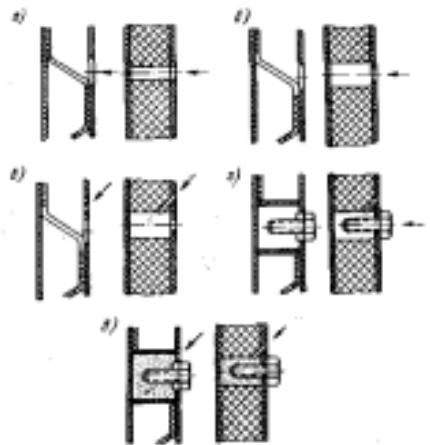


Рис. 311. Последовательность операций при установке деталей насыщения на трехслойных панелях:  
а — введение отверстия под крепеж; б — выборка полости; в — сверление отверстия для ввода формовочной пасты; г — установка технологического крепежа; д — заполнение полости формовочной пастой.

Крепление насыщений к трехслойным конструкциям производится на винтах, болтах, шпильках, вворачиваемых в заполненные формовочной пастой гнезда, заранее подготовленные в заполниателе.

Установку деталей насыщения целесообразно производить, придерживаясь следующего порядка проведения технологических операций (рис. 311):

- разметить места установки крепежа;
- просверлить в одном наружном слое отверстия под болты (в коробчатых панелях — отверстия диаметром, достаточным для установки эластичных втулок);

— в панелях с пенопластовым или сотовопластиковым заполнителем выбрать через просверленные отверстия специальную фрезу (рис. 312, а) цилиндрические полости, доходящие до второго наружного слоя (в коробчатых конструкциях цилиндрические полости выбираются в том случае, когда места установки крепежа попадают на внутренние ребра);

- просверлить входные отверстия для ввода формовочной пасты;
- нанести на крепеж противодегазационное покрытие;
- установить крепеж в подготовленные полости (в коробчатые конструкции через отверстия для крепежа ввести эластич-

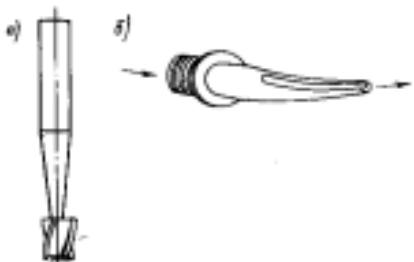


Рис. 312. Конструкции фрез (а) для выборки цилиндрической полости в трехслойных панелях и (б) для ввода формовочной пасты.

ные втулки из пенопласта марки ПХВ-3, а на крепеж надеть специальные шайбы для закрытия зазора между крепежом и отверстием);

— заполнить полости через входные отверстия формовочной пастой, вводимой шприцем со специальным наконечником (рис. 312, б);

— через 48 ч., после заполнения полостей формовочной пастой, вывернуть крепеж и произвести установку деталей насыщений на штатный крепеж.

Полное отверждение формовочной пасты наступает через тридцать суток при температуре окружающей среды 18–20°C. Процесс полимеризации может быть ускорен до 3 ч. путем нагрева до 60–80°C. Формовочная паста изготавливается на основе эпоксидного компаунда К-153 или смолы ЭД-5. Составы такой пасты приведены в табл. 39 и 40.

Таблица 39

## Рецептура формовочной массы на основе композиции К-153

Композиция	ГОСТ или ТУ на постформ	Количество зернистых частей	Назначение композиции
Композиция К-153 Железный порошок Полиакрилонатная кислота и кубовый агент (тексамонит-диминий)	СТЭ/ЭО-14161—64 ГОСТ 3849—61 ВТУ II-10-57	100 50-70 10	Схватывающее Наполнитель Отвердитель

Таблица 40

## Рецептура формовочной массы на основе смеси ЭД-5

Композиция	ГОСТ или ТУ на постформ	Количество зернистых частей	Назначение композиции
Эпоксидная смесь ЭД-5 Пластификатор Л-18	ГОСТ 10867—63 ВТУ ЦНИИПИЛ 299—64	100 80	Схватывающее Пластификатор и отвердитель
Железный порошок	ГОСТ 9846—61	50-70	

## § 34. Механическая обработка пластмасс

Одной из основных операций при сборке и монтаже пластмассовых конструкций является механическая обработка (обрезка, сверление, зачистка поверхности и т. д.). Механическая обработка пластмасс имеет свои особенности. Рабочий инструмент при разрезании, сверлении, фрезеровании нагревается значительно сильнее, чем при обработке металлов. Основная причина этому — малая теплопроводность пластмасс. Охлаждающие эмульсии применять не рекомендуется из-за их отрицательного действия на пластмассы. В результате рабочая часть стандартного инструмента быстро выходит из строя. Для обработки пластмасс следует применять инструмент из специальных материалов (быстроизнашивающие стали, алмазные круги и т. д.) с особыми ударами заточки. Некоторые виды пластмасс обладают большой агрессивностью, что может привести к дроблению, склизанию их.

Для обеспечения качественной обработки режимы резания и угла заточки инструмента необходимо назначать приспособленно к данному виду пластмассы. В состав пластических масс входят минеральные наполнители (песок, карборунд, стекло и т. д.), которые обладают абразивными свойствами. Это

## Использованный инструмент, применяемый для обработки пластмасс

Наименование инструмента	Первичный инструмент	Рабочий орган
Подготовка оксидной рабочей, удаление технологических прорезей, нарезание профилей (дверей, ящиков-нагнетателей и др.)	Пневматическая машина марки АМП-1 Мощность двигателя при давлении воздуха 5 кг/см <sup>2</sup> 120 л. с.; число оборотов диска 10000 мин <sup>-1</sup> ; максимальная толщина разрезаемого материала 10 мм; скорость резания 28 мин <sup>-1</sup> ; вес 8 кг	Алмазный круг (ГОСТ 10099—63) диаметром 300 мм
Квадратурия оксидной рабочей, удаление технологических прорезей, нарезание профилей (дверей, ящиков-нагнетателей и др.)	Пневматическая машина марки ПН-1 Мощность двигателя при давлении воздуха 5 кг/см <sup>2</sup> 85 л. с.; число оборотов диска 10000 мин <sup>-1</sup> ; максимальная толщина разрезаемого материала 10 мм; скорость резания 28 мин <sup>-1</sup> ; вес 8 кг	Носковочное колесо (80×1,2 мм)
Подготовка поверхности конструкций, рабочая, детали к предварительному насыщению под крафтингом	Пневматическая машина марки ДМ-175 Мощность двигателя при давлении воздуха 5 кг/см <sup>2</sup> 15 л. с.; число оборотов диска 10000 мин <sup>-1</sup> ; скорость суперфилинга 30—35 мин <sup>-1</sup> ; вес 15 кг	Диск шлифовальный
Борисовский отвертый	Пневматическая машина марки ЛМ-50 Мощность двигателя при давлении воздуха 5 кг/см <sup>2</sup> 1 л. с.; число оборотов 450 об/мин; диаметр рабочего инструмента 100 мм; максимальная толщина обрабатываемого материала 25 мм; вес 1,5 кг	Аbrasивная линза (300×50 мм)
	Устройство для нарезания отверстий марки У-105Р Мощность двигателя при давлении воздуха 5 кг/см <sup>2</sup> 1 л. с.; число оборотов 450 об/мин; диаметр рабочего инструмента 100 мм; максимальная толщина обрабатываемого материала 25 мм; вес 1,5 кг	Соединительные пластины
	Пневматическое устройство марки У-500 для нарезания отверстий Мощность двигателя при давлении воздуха 5 кг/см <sup>2</sup> 54 л. с.; число оборотов 700 об/мин; рабочий инструмент обратимого действия 25 мм; диаметр заготовки отверстий 100—200 мм; вес 4,5 кг	

**Предложения**

Назначение оборуд.	Применяемый механический инструмент	Рабочий орган
Вырезание отверстий	Устройство У-500И для вырезания отверстий диаметром 200—500 мм	
Сверление отверстий	Пневматические машины марок МС-6, МС-9, МС-15, МС-23, МС-32, МС-50, предназначенные для сверления отверстий, диаметр которых соответствует номерам машинок	Специальные сверла

обстоятельство способствует быстрому износу рабочего органа инструмента.

При возможности использования стационарного оборудования для механической обработки пластмассовых деталей и отдельных элементов конструкций следует производить на деревообрабатывающих круглошлифовальных, фрезерных, ленточнопильных, шлифовальных и сверлильных станках. Ставки должны быть оснащены специальными режущими инструментами.

Если в процессе монтажно-сборочных работ не представляется возможным воспользоваться стационарным оборудованием, механическую обработку пластика производят переносными механизированными инструментом, перечень и характеристики которого приведены в табл. 41.

### § 35. Контроль качества

В процессе изготовления падстроек, рубок и переборок из пластика могут возникать различного рода дефекты, вызываемые неточностью изготовления технологической оснастки, использованием некачественных материалов, отступлением от технологических режимов и т. д. Для предотвращения брака необходим тщательный контроль на всех стадиях изготовления и монтажа пластмассовых падстроек, рубок, переборок.

Проверка форм (гостелей, матриц) для изготовления конструкций, блоков набора и других деталей. Проверять оснастку следует в том положении, в котором будет производиться изготовление конструкций, в не ранее чем за два часа до начала формоизделий работ. Геометрические формы (обивки) поставляются для изготовления конструкций, имеющих сложные отверстия,

роверяют шаблонами. Зазор между шаблоном и постелью допускается не более 3 мм. Плоские гостели проверяют шергелем. Горизонтальность установки постели контролируют с помощью шлагштого ватерпаса, прикладывая его по углам в центре постели. Отклонение по горизонтальности допускается не более 3 мм. Профиль сетки форм для изготовления блоков набора проверяется шаблонами по всей длине, при этом отклонения допускаются не более 1 мм. Прямолинейность форм проверяется по натянутой линии. Наибольшее отклонение от прямолинейности не должно превышать 3 мм на общую длину. Оснастка для изготовления набора, имеющего криволинейную форму, проверяется шаблоном. Зазор между шаблонами и поверхностью оснастки не должен превышать 2 мм.

Оснастка, состоящая из отдельных элементов, проверяется на компактность и точность расположения узоров, обеспечивающих получение заданной толщины детали.

Соединение полуформ при изготовлении деталей таврового зabora производится только на фиксаторах. Сдвиг полуформ после их соединения не допускается.

Конструкция соединения пuhanона и матрицы должна исключать возможность смещения стеклоподложивающего материала в процессе обжатия.

Контроль за приготовлением в нанесении разделительного и декоративного слоя, смыкающегося в раскроем стеклоподложивающим материалом. Качество приготовления разделительного слоя контролируется визуально. В растворе не должно быть комков и каких-либо других выключений. Разделительный слой должен быть нанесен равномерно по всей рабочей поверхности оснастки в два приема. Местные отсланивания, утолщения и повреждения слоя не допускаются. Контроль за приготовлением декоративного слоя заключается в проверке вязкости охрупченного смыкающего. Вязкость смыкающего по воронке ВЗ-1 должна быть не более 100 сек. Качество нанесения декоративного слоя определяется визуально, толщина слоя должна быть не более 0,3—0,4 мм.

При изготовлении салазующего не допускается наличие в нем щипков и каких-либо включений.

Контроль за раскроем стеклоподложивающих материалов сводится к проверке размеров на соответствие их картам раскроя. Раскрой, выкладываемый по месту, проверяется визуально. Отклонение размеров и формы раскроенного стеклоподложивающего материала от шаблона или от заданных размеров допускается не более  $\pm 3$  мм. На малых заготовках стеклоподложивающего материала должно быть изнесено заправление осью. Перегибы и склады стеклоподложивающего материала не допускаются.

Контроль за изготовлением конструкций. При изготовлении наружной обшивки падстроек и полотнищ переборок

в процессе этой работы следует осуществлять контроль за укладкой, утолщением и пропинкой каждого отдельного слоя стеклополокансткого материала.

Для осуществления послойного контроля выделяют контролеров из расчета один контролер на 15—25 рабочих-формовщиков или один контролер на всю смесь, если количество работающих формовщиков в смеси не более 25 человек.

Укладка слоев стеклополокансткого материалов контролируется внешним осмотром. Количество слоев и расположение основы стеклотканей должны соответствовать заданию. Переизбы и склады стеклополокансткого материалов не допускаются. Стыки полотнищ разгибаются по всей ширине заделки. Величина смещения стыков соседних слоев должна быть не менее 150 мм. При укладке полотнищ, стекломатериалов встык зазоры между кромками не допускаются.

После вымучивания деревьев в работе, перед укладкой следующего слоя стеклополокансткого материала отформованная поверхность должна очищаться от грязи и посторонних предметов. Утолщение каждого отдельного полотнища контролируется внешним осмотром. Не допускаются сдвиги стеклотканей, морщины, воздушные включения и загрязнения формируемой поверхности. Отклонение веса связующего от заданного значения не может быть более  $\pm 2\%$ .

Обжатие деталей должно производиться по заданной технологической схеме (от середины детали к ее концам). Величина обжатия контролируется линейкой или штангенциркулем по расстоянию между крайними пластины. Отклонение не должно превышать  $\pm 2$  мм. Обжатие прекращается не ранее чем через один сутки, а выем детали из формы производится через 3 суток с момента окончания изготовления.

Детали после их освобождения из формы следуют выдерживать не менее 15 суток при температуре 22—26°C и относительной влажности не более 65%. Механическая обработка деталей разрешается по истечении 5 суток с момента окончания формования, если температура и влажность соответствуют принятим для формования условиям.

Детали, имеющие сравнительно небольшую жесткость, следует хранить в специальных стеллажах или складских местах в положении «на ребра».

Принемка конструкций и деталей. Конструкцию проверяют на чистоту и качество поверхностей в соответствие чертежным (заданным) размерам с учетом притусков. Чистоту поверхности контролируют визуально. Наличием смолы, ароматов поверхности, воздушных включений в поверхностных слоях, местные дефекты у кромок при изготовлении должны быть устранимы.

Примончиваемость стенок рубок, надстроек и деталей проверяют по натянутой пите. Между натянутой пите и стенками

конструкции допускается зазор не более 1 мм на 1 пог. м и не более 3 мм на общую длину.

Принемка балок набора и других деталей производится после механической обработки. Профиль, высоту и толщину детали проверяют по длине детали только в отдельных местах выбороочно. Профиль детали контролируют шаблоном, толщину детали штангеницируют, индикаторной скобой или линейкою с индексомомером. Размеры плоских деталей проверяют метром или рулеткой. Форму и профиль детали сложной конфигурации проверяют шаблоном. Отклонение размеров детали от заданных или формы ее от шаблона должно быть не выше  $\pm 2$  мм. Расположение вырезов для прохода продольного и поперечного кабеля, шлаготов и пр. проверяют шаблоном или метром. Отклонение от размеров, указанных в чертеже, не должны превышать  $\pm 3$  мм. Углы вырезов следует скруглять на радиус 25 мм.

Полотнища и другие изделия, служащие в процессе дальнейших работ базой для сборки конструкций, снимают с постели и рекомендуется. Проверка таких изделий производится после сбояки конструкции.

Контроль качества материала конструкции. Качество материала конструкции, изготовленной из стеклопластика, проверяют испытаниями образцов, вырезаемых непосредственно из конструкции. Для обеспечения возможности получения таких образцов при изготовлении крупногабаритных изделий (полотнищ) и основных несущих блоков набора (карлингов, рамных жесткостей и т. д.) должны быть предусмотрены: у полотнищ — специальные притупки (контрольные пластины) размером 500×600 мм; у балок набора и других ответственных деталей — увеличение длины на 500 мм. Образцы для проверки физико-механических характеристик материала других деталей набора (балок продольного и поперечного изгиба, ребер жесткости, бракетов) вырезаются непосредственно из самих деталей, которые выбираются работниками ОТК из горячей партии.

Контрольные планки и выбранные для испытаний детали должны выдерживаться до проведения испытаний не менее 15 суток в условиях их изготовления (при той же температуре и относительной влажности воздуха).

Материал (стеклопластик) судовых деталей и изделий подвергается испытаниям на растяжение, сжатие и изгиб, а при толщине 10 мм и выше — и на срез, в процессе которых определяются прочности при растяжении, сжатии, изгибе и срезе. Материал детали или изделия считается удовлетворительным, если полученные показатели соответствуют минимально допустимым, установленным проектантами совместно с заказчиком.

В том случае когда конструкция изготавливается трехслойными, следует проверять качество склейки наружных листов

с затяжителем. На 1 м<sup>2</sup> конструкции допускается до трех непреклесов (спонциентрированных) площадью не более 3 см<sup>2</sup> каждый.

Контрольно-промерочные работы при сборке. Контрольно-прроверочные работы при сборке надстроек и переборок производятся по схемам в и отдельных случаях при переходах.

Разметка под установку продольного и поперечного набора на полотнищах налив, наружных стеков надстроек и переборок проверяется на соответствие чертежу. Проверка производится рейками с плаза и шаблонами. Допускаемое отклонение не более  $\pm 2$  мм.

Зачистка поверхности полотнища и деталей в местах наложения соединительных уголников и накладок контролируется визуально. Зачистку поверхности от смолы следует производить до верхнего стеклоформирующего материала. За 20 мин. до наложения соединительных уголников и накладок эти поверхности необходимо обезжирить.

Контроль установки набора и деталей производится после установки их на клей для приваривания. Смещение кромок набора и других деталей от линии разметки допускается не более  $\pm 2$  мм. Зазоры между деталями и полотнищами, а также между смежными деталями не должны превышать 5 мм. Вертикальность или угол установки деталей относительно полотнища или друг друга проверяют по отвесу, угольнику или малюшнику. Отклонение от вертикали или заданного угла в верхней точке при установке детали высотой 100 мм допускается до 2 мм, для деталей большей высоты до 3 мм. Несошление кромок стыкуемых деталей не должно превышать 0,3 толщины детали в данном месте, но не более 5 мм. Качество соединения деталей контролируется визуально.

Послойной проверке подвергаются укладка, уплотнение и пропитка стеклоформирующего материала соединительных уголников и накладок.

По окончании сборочных работ конструкция (узел, секция или трисекция) должна быть выдержана на постели не менее 3 суток с момента выполнения последнего соединения.

Проверка готовых узлов и секций производится после окончания всех работ по их изготовлению и зачистке.

Качество соединения деталей между собой и с полотнищем проверяется визуальным осмотром и простукиванием уголников и накладок. Отслоение кромок соединительных уголников и накладок, включения воздуха между ними и поверхностью соединительных деталей (непреклес) не допускаются. Отклонение форм и размера соединительных уголников и накладок от заданных допускается по ширине до 10 мм, по толщине до  $\pm 1$  мм.

Чистоту внешней обшивки секций и узлов проверяют визуальным осмотром. Клеевые подтеки не допускаются. Поверх-

ность плоских узлов секций и подсекций проверяется шергелем, длина которого должна быть не менее 3 м. Зазор между поверхностью конструкции и шергелем не должен превышать 3 мм. Краиненные поверхности узлов, секций, подсекций проверяются контратрапезом, изготовленным по данным плана. Зазор между контратрапезом и поверхностью узла или секции не должен превышать 3 мм.

Толщина обшивки узлов секций определяется индикаторной скобой не ближе 10 мм от кромки. Отклонение толщины обшивки от заданной при обязательном соблюдении количества слоев стеклоформирующего материала допускается в следующих пределах: для налив толщиной до 10 мм — до  $\pm 0,5$  мм, для налив толщиной свыше 10 мм —  $+1,5$  мм к  $-1,0$  мм.

Волнистость швов проверяется на кромках секций и узлов. Оклюзование размера швов от заданных чертежом допускается до  $\pm 5$  мм.

Главные размеры секций и узлов по длине, ширине и высоте проверяются от контрольных линий. Отклонение допускается: для конструкций размером до 5 м — не более  $\pm 5$  мм, для конструкций размером свыше 5 м — до  $\pm 8$  мм.

Технологическим процессом должна быть предусмотрена проверка комплектности секций (по спецификации чертежа), а также наличия и размеров монтажных приспособлений (если они предусмотрены). Отклонение от величины монтажного приспособления допускается до 15% от размера, указанного в чертеже или в технологическом процессе.

Контроль работ по установке ма сруда надстроек и переборок. Положение конструкции надстроек на судне проверяется: по длине — путем совмещения теоретических линий (среднего швагогута), наивысших на настиле палубы и продольных стеков конструкции (допускаемое отклонение  $\pm 4$  мм), по полушироте — совмещением контрольных линий ДП, наивысших на настиле палубы и поперечных стеках конструкции. При отсутствии поперечной стены положение конструкции по полушироте определяют по отвесу, опущенному по линии ДП, наименьшей на крыше рубки (надстройки). Допускаемое отклонение  $\pm 3$  мм. Положение конструкции надстроек по высоте проверяется промеражем в ДП и других местах, указанных в чертежах.

Контрольно-прроверочные работы проводятся как в процессе подготовки конструкций к монтажу, так и в процессе самих монтажных работ.

Несошление теоретических линий набора стыкуемых конструкций не должно превышать 5 мм, а теоретических линий блоков набора, разделенных переборками или другими конструкциями, — 0,3 толщины стены. Несошление по толщине для блоков набора допускается не более 0,3 толщины стенки. Зазор

между кромками обшивки стыкуемых секций может быть для обшивки толщиной до 6 мм — не более 2 мм, для обшивки толщиной выше 6 мм — не более 3 мм.

Несошвовщие по толщине (разностенность) кромок обшивки должно быть не более 0,25 толщины.

Форма кромок и метод их обработки должны соответствовать типу соединений.

Значительная поверхность обшивки полотниц, а также балок набора соединений секций в местах наложения соединительных накладок и уголников контролируется визуально. Выполнение монтажных соединений также контролируют визуально. Последней проверке подвергается укладка, уплотнение и пропитка стеклопаримирующего материала соединительных накладок и уголников.

Непролей между соединительными накладками или уголниками и поверхностью обшивки, полотнищ и балок набора соединений секций определяется простукиванием или шумом по кромкам соединительных накладок или уголников. При обнаружении отслоения в плоскости соединения (стяжкой) дефектный участок должен быть снят, место под ним зачищено и соединение выполнено заново.

Для проверки прочностных характеристик наиболее ответственных монтажных соединений необходимо изготовить контрольные образцы. Соединение контрольных пластиков следует производить одновременно с выполнением монтажных соединений в том же помещении, в тех же условиях, из той же партии смолы, стеклопаримирующих материалов и в заранее определенном пространственном положении.

Контрольные пластики после выполнения соединения выдерживают в условиях изготовления (температура, относительная влажность воздуха) не менее 15 суток, после чего отправляют на механические испытания.

Контроль работ по установке насыщений. Правильность разметки мест установки деталей и изделий насыщения проверяется от контрольных линий. Допускается отклонение  $\pm 2$  мм. Все вырезы под установку деталей и изделий насыщения должны быть скруглены. Радиус скругления должен быть не менее 25 мм. Вырезы в местах соединительных уголников и накладок не допускаются. При перемещении установочных болтов крепление насыщений проверяется на водонепроницаемость.

После окончания установки насыщений проверяют:

- точность размещения насыщений;
- наличие отслонений приформовок и зазоров в клеевых соединениях (обнаруженные дефекты должны немедленно устраняться);
- прочность креплений выборочным способом с помощью удара молотком (в основном креплений, вызывающих сомнений).

## § 36. Техника безопасности и охрана труда при изготовлении из пластмасс судовых конструкций

При изготовлении судовых пластмассовых конструкций рабочие находятся в контакте с различными вредными химическими веществами. В воздухе рабочего помещения выделяются пары и пыль различных материалов.

Рассмотрим воздействие основных химических материалов, используемых при производстве судовых пластмассовых конструкций, на человеческий организм.

Полиэфирные смолы разрушают кожу и слизистые оболочки. Степень воздействия смол зависит от содержания в них жидкого мономера — спиролы. Спирола обладает общим паркотическим действием, длительный контакт с ним приводит к раздражению кожи и слизистых оболочек, изменениям в крови.

Общее воздействие эпоксидных смол определяется составляющими их компонентами. На кожу наиболее раздражающие действуют комбинация эпоксидной смолы — отвердителя, особенно эпоксидная смола — амин. Пыль смолы, выделяющаяся при механической обработке, раздражает кожу и слизистые оболочки. Пыль стеклопластикового полотна при длительном воздействии вызывает заболевание легких — пневмококк, раздражающие действует на кожу и слизистые оболочки.

Ацетон вступает в организм человека при дыхании, действует как наркотик, способен накапливаться в организме, вызывает анемию и изменения в верхних дыхательных путях, при длительном контакте появляются сухость и краснота кожи.

Бензол входит в центральную нервную систему (паркотическое действие, судороги). Длительное воздействие вызывает тяжелые изменения в крови. Жидкий бензол раздражает кожу. Диметиламин и диметиллимин одинаково воздействуют на организм человека: при вдыхании вызывают слабость, головокружение, тошноту, при контакте с кожей — глубокие изъязвления. Изопропиленбензол сильно действует на нервную систему (сильнее, чем бензол). Полиэтилендиамин в больших концентрациях и дозах нарушает дыхание, угнетает центральную нервную систему. При длительном воздействии на кожу возникают поражения этой язвенного дерматита. Малеиновый и фталевый ангидриды (пары и пыль) обладают способностью раздражать кожу и слизистые оболочки.

При изготовлении и монтаже пластмассовых конструкций и переборок избавиться от характера производства (опытное, полупроизводственное, серийное) следует соблюдать правила техники безопасности, охраны труда и санитарии в соответствии с действующими нормами.

Отдельные производственные помещения должны выделяться для следующих видов работ:

- предварительного раскрытия стеклоткани;
- приготовления связующего;
- изготовления деталей и конструкций;
- монтажа и сборки конструкций;
- механической обработки;
- мойки тары, инструмента, приспособлений.

При производственных помещениях необходимо оборудовать вспомогательные и бытовые помещения: склады, кладовые хранения инструмента и приспособлений, гардеробные, умывальные, душевые, административные помещения, лаборатории, помещения для чистки рабочей одежды, помещение для приема пищи, курительную комнату и др.

Помещения рабочих должны быть изготовлены из материалов, устойчивых к действию агрессивных веществ и легко поддающихся влажной уборке (например, из мелкозернистых плиток).

В качестве переносных светильников можно использовать только светильники во взрывозащищенном исполнении, а для помещений хранения и приготовления связующего — светильники во взрывонепроницаемом исполнении.

Рабочие помещения должны обеспечиваться механической вентиляцией. Обязательно наличие резервного вентилятора, автоматически выключающегося при остановке основного вентилятора. Решетка на выходе воздуха не допускается. У рабочих мест для раскрытия стеклоткани, формования деталей и элементов конструкций, приготовления связующего предусматривается местная пылевая вентиляция. Эти требования распространяются и на места, где производится монтаж и сборка конструкций. Вытяжные устройства следует располагать вблизи рабочих мест формования. Тип местного вытяжного устройства зависит как от величины и формы изделий, так и от технологического оборудования.

Столы для раскрытия стеклоткани, формования конструкций и других подобных операций покрывают гладкими прочными материалами, легко очищаемыми от пыли.

При массовом производстве пластмассовых конструкций необходимо механизировать процесс изготовления связующего при максимальной герметизации (герметизация). Особое внимание следует обращать на коридор ввода в смолу инцидентора и ускорителя. Вводить в смолу инцидентор и ускоритель надо параллельно после щадительного перемешивания предыдущей добавки со смолой. Одновременное введение в смолу инцидентора и ускорителя запрещается во избежание взрыва. Нельзя допускать соприкосновения гидроперегородки капропроизводства с нефтепродуктами, кобальтом, синтетиками, резиной, синтетическим каучуком, с горючими и легковоспламеняющимися веществами, нельзя оставлять ее на свету. Контакт работающих

со связующим и его компонентами при обслуживании оборудования необходимо свести до минимума.

На ручных инструментах (кинты, шпатели и др.), используемых для нанесения связующего, должны предусматриваться защитные экраны, а при раскрытии стеклоизолирующих материалов — приспособления, ограждающие руки работающих от порезов.

По мере расходования смолы тару надо немедленно передавать на мойку. По окончании работы необходимо вымыть пульверизаторы, юрма, кисть. Мытье тары и инструмента производится в специальном отведенном помещении; использование юмы органические растворители запрещается. При массовом изготовлении пластмассовых конструкций юмы тары должны быть механизированы.

Оборудование располагают таким образом, чтобы обеспечить безопасность работы, удобство обслуживания и ремонта.

Несыпучие полимерные смолы хранятся на складе при температуре, указанной в технических условиях, в темноте. Транспортируются они как опасенный продукт. Бочки с гидравликой должны храниться в чистом сухом помещении с температурой не выше 30°С. При необходимости временного хранения гидравлизы на открытом воздухе бочки размещают отдельно от всяких других грузов и закрывают, чтобы предотвратить от попадания солнечных лучей. Перенос бензина хранят в стеклянных бутылках под слоем воды. Ускорители размещают отдельно от инициаторов и в сухом темном помещении с температурой не выше 5°С; перевозят из как ограниченный продукт. Гидравлизы в перекрытиях бензина могут перевозиться исключительно транспорта при условии удаления тары от источников тепла, но использовать открытые платформы не разрешается. При лог-грузах в вагон, автомашину, склонят тару устанавливают только в один ряд по высоте, пробками зверк с использованием приспособлений, препятствующих раскатыванию.

Перспективное значение при изготовлении пластмассовых конструкций имеют соблюдение личной гигиены, обеспечение рабочих средствами индивидуальной защиты и медицинское обслуживание. Все рабочие должны быть обеспечены спецодеждой (халат или куртка с брюками, нарукавники, фартук, косынка и перчатки), предохранительными приспособлениями и индивидуальными защитными средствами. Администрации обязаны не допускать к работе лиц без спецодежды и греющих индивидуальных защит. В помещениях со значительной замененностью воздуха необходимо применять противопылевые решетки типа ШБ-1, «Левесток», РИИ-57 или Ф46. Если изготовление стеклоткани производится методом напыления, рабочие должны быть в скафандрах облегченного типа или шапитовых противогазах. Для предохранения кожух рук от контакта с химическими веществами употребляются различные

защитные пасты и мази типа «биологических перчаток», ХНОТ-6 и др. Для защиты глаз от частиц стеклопластикста при мезанитической обработке пользуются бесцветными очками.

Необходимо систематически следить за соблюдением рабочими мер личной гигиены, за чистотой половиков, спироходов, рабочих столов, инструментов и посуды; не допускать совместного хранения личной и специальной одежды, выброса специальной одежды с предприятия. В рабочих помещениях нельзя принимать пищу, курить, хранить личную одежду и продукты питания.

К работе со смолами, стеклопаркирующим материалом и стеклопластиком допускаются только те рабочие, которые предварительно прошли медицинский осмотр и получили разрешение врача. Все работающие со смолами и отвердителями должны периодически, раз в год, а работающие со стеклопластиком — один раз в 6 месяцев подвергаться медицинскому осмотру.

При работах по изготовлению пластмассовых конструкций даже при соблюдении мер предосторожности возможны различные травмы — покраснения глаз, ожоги, отравления. Каждому работнику, связанному с изготовлением конструкций из стеклопластика, необходимо знать правила оказания первой медицинской помощи.

В отношении пожарной опасности производственные и складские помещения участка по изготовлению пластмассовых конструкций делятся на следующие категории:

категория А — помещения для хранения взрывобояльных инцидентов и ускорителей;

категория Б — помещения для приготовления связующего, изготовления конструкций, хранения смол;

категория Д — помещения для предварительного раскроя и механической обработки стеклопластиков.

Особую пожарную опасность представляет работа с химическими винилами, являющимися составными частями связующего. Работники участка должны знать степень пожароопасности и взрывоопасности смесей применяемых линейочных винилов, обязаны пройти инструктаж по противопожарной безопасности.

Основные принципы противопожарной безопасности сводятся к следующему:

— объемы производственных помещений должны рассчитываться по норме не менее 6 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>2</sup> формируемой поверхности конструкции или открытой поверхности связующего;

— в рабочих помещениях необходимо иметь не менее двух выходов;

— расстояние от наиболее удаленного рабочего места до выхода наружу не должно превышать в однозэтажных зданиях 65 м, в многоэтажных 50 м;

— в помещениях участка не разрешается применять печное отопление;

— на участке должны быть разработаны порядок эвакуации, порядок в средство сигнализации при пожаре;

— складские помещения необходимо оборудовать вытяжной вентиляцией, электромоторами заземлены и обеспечить их бесперебойную работу, склады снабдить огнетушителями марки ОПЛ ящичками с песком, щитами с противопожарным инвентарем;

— нельзя хранить в производственных помещениях отходы, загрязненные связующим. Ненапользованные концы и триксы надо сбрасывать в емкости, находящиеся вне производственных помещений, в местах, согласованных с органами пожарного надзора;

— запрещается совместная переработка гипериза с ускорителями, концентрированными минеральными кислотами, горючими и легковоспламеняющимися химическими веществами.

Необходимо строго соблюдать последовательность введения в смолу инцидента и ускорителя (инцидент, затем ускоритель). При нарушении порядка образуется взрывоопасная смесь, которая может вызвать пожар.

Администрация предприятий в организаций обязаны:

— не допускать проведения работ без утвержденных в установленном порядке технологических инструкций и другой технологической документации, учитывающей местные производственные условия и включающей требования техники безопасности;

— не допускать к работе лиц, не прошедших обучение и не знакомых с требованиями техники безопасности и противопожарной охраны и не славших соответствующих испытаний;

— обеспечить поседневный контроль за соблюдением требований технологического процесса и инструкций по безопасности проведению работ.

## Глава IX

### РЕМОНТ ПЛАСТИММАССОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

#### § 37. Характеристика возможных дефектов и способы их определения

Пластмассовые надстройки, рубки, переборки, как в процессе установки, монтажа, так и при эксплуатации могут получать различные повреждения, которые необходимо своевременно устранять.

Появление повреждений и дефектов может быть обусловлено погрешностью расчета и конструирования, искачественным изоготовлением, условиями эксплуатации.

Определение повреждений и дефектов может производиться следующими способами:

— внешним осмотром, при котором выявляются дефекты, видимые невооруженным глазом;

— с помощью контрольно-измерительной аппаратуры, предназначенной для обнаружения внутренних дефектов и замера толщины поврежденных деталей и изделий из стеклопластика.

Внешний осмотр конструкций является первой стадией дефектования. При внешнем осмотре конструкций применяют: рулетку (длиной 150–200 см) для обтукивания, измерительную линейку для замера видимых граней, расслоений стеклопластика и определения размеров пробоин, трещин и т. д.; шуп для определения отслойки соединительных элементов (накладок, утюньников и т. д.).

Осмотр должен производиться в определенной последовательности, чтобы избежать повторного осмотра или пропуска отдельных элементов конструкции. Наружную обшивку обычно осматривают с носа к корме по длине и начиная от палубы по высоте; набор осматривают по помещениям и бортам, переборка — с носа к корме. Во время осмотра наружной обшивки необходимо обращать внимание на ее состояние в местах соединений и на наличие пробоин, трещин и расслоений.

При осмотре набора учитывают видимые расслоения, трещины, разрывы в стеклах и позаках балок, следят за состоянием

соединений набора на стыках, в местах пересечения и притыкания, а также за исправностью соединений набора с обшивкой, настилом и т. д.

При осмотре непропицаемых переборок необходимо проверять места соединения переборок с наружными стенками надстроек в состоянии соединительных узлов в местах пересечения балок продольного набора с переборками.

Осмотряя соединения, необходимо обращать внимание на степень их повреждения, определять величину площади отслоения накладок и утюньников от соединительных деталей, проверять, нет ли в вакуумах и углах трещин и расслоений.

При внешнем осмотре той или иной конструкции для выяснения ее состояния и пригодности к дальнейшей эксплуатации производится:

- обтукивание деталей и их соединений ручником;
- определение граней поврежденного участка (пробоин, трещин, расслоения и т. п.);
- испытание конструкций воздухом или водой.

Все выявленные в результате осмотра корпусных конструкций и подлежащие устраниению дефекты отмечаются краской или мелом.

Выявление дефектов с помощью контрольно-измерительной аппаратуры является второй стадией дефектования и производится после внешнего осмотра конструкций. Дефектование с помощью контрольно-измерительной аппаратуры подразделяет корпусные конструкции в местах с явно выраженным повреждениями (пробоинами, трещинами, расслоениями стеклопластика, видимые невооруженным глазом) с целью уточнения границ поврежденного участка. В качестве контрольно-измерительной аппаратуры применяют дефектоскопы ДИК-1 и ДУК-12 и приборы для измерения толщины — толщиномеры УРТ-7с, ЗМТ-2А, ТМП-1.

Импедансный акустический дефектоскоп ДИК-1 пред назначен для определения внутренних дефектов конструкций из стеклопластика. Этот прибор обеспечивает обнаружение воздушных включений, расслоений и т. п. площадью не менее  $20 \text{ mm}^2$ , на глубине не более 6 мм при толщине стеклопластика до 10–12 мм. Ультразвуковой импульсный дефектоскоп ДУК-12 предназначен для определения толщины и обнаружения внутренних дефектов конструкции из стеклопластика. Максимальная измеряемая глубина залегания дефектов от 4 до 30 мм. Максимальная площадь выявляемого дефекта (воздушных включений, расслоений и т. п.) —  $20 \text{ mm}^2$ .

Ультразвуковой резонансный толщиномер УРТ-7с позволяет производить замеры толщины (от 2 до 40 мм) при одностороннем доступе. Акустический контакт шупа с поверхностью конструкции осуществляется через тонкий слой смазки (масло или вода). Для обеспечения высокой точности и чувствительности прибора

необходимо плотно и равномерно прижимать скрепитель к поверхности изделия.

Толщиномер изоэлектротриводных материалов ТИМ-1 и электромагнитный толщиномер ЭМТ-2А предназначены для замера толщины конструкций из пластмасс с использованием металлической подкладки (для чего требуется двухсторонний доступ).

Рассмотрим возможные дефекты пластмассовых конструкций.

Дефекты пластмассовых конструкций, связанные с неточностями расчета и конструирования:

- недостаточная жесткость конструкции;
- расслоение от усталостных напряжений и при концентрации напряжений;

Дефекты конструкций, возникающие в связи с некачественным изготовлением:

- пористость;
- трещины в связующем;
- посторонние включения;
- местные выпучивания поверхности;
- отклонения толщины конструкции от заданной;
- отслоение соединительных накладок и уголников (вентилем).

Дефекты пластмассовых конструкций, возникающие в процессе эксплуатации:

- повреждение отеки;
- повреждение декоративного слоя;
- царапины;
- зарозы;
- трещины;
- пробоины;
- изломы балок набора;
- повреждения соединительных элементов;
- расслоение;
- разрушение конструкции до полной неизгодности.

Из перечисленных повреждений и дефектов наиболее опасными являются пробоины. В зависимости от размеров пробоины можно разделить на следующие группы: малые (плоскость не превышает  $0,05 \text{ м}^2$ ), средние (не более  $0,2 \text{ м}^2$ ), большие (до  $2 \text{ м}^2$ ), очень большие (свыше  $2 \text{ м}^2$ ).

Необходимость ремонта пластмассовых надстроек, рубок, переборок определяется в зависимости от характера дефектов и требований, предъявляемых к конструкции.

Конструкции, разрушенные до такого состояния, что ремонт их невозможен или нецелесообразен, должны быть заменены новыми. Не допускаются к эксплуатации конструкции, получившие повреждения в виде трещин, прорезов (на глубину не бо-

лье одного слоя армирующего материала), изломов, пробоин, расслоений во всей площади конструкции и т. д. Такие повреждения должны быть устранимы путем ремонта конструкции.

### § 38. Способы выполнения ремонтных работ

Работы по устранению повреждений и дефектов могут проводиться как во время эксплуатации судна силами экипажей, так и при очевых ремонтах, в зависимости от характера и размера дефектов.

Для выполнения краткого ремонта необходимо иметь на рабочем месте трафарет, определяющий температуру и влажность воздуха (термометр Аугуста), весы с разновесами, чистую сухую посуду, кисти, ножницы, клавук, петощипы, ацетон, стеклоткань, смолу, отверждющие и тиксотропные добавки.

Место, подлежащее ремонту, высушивают, тщательно зачищают и обезжиривают раствором. Затем готовят армирующую стеклоткань и связующее. Готовое связующее должно быть использовано в течение 1–2 час. с момента приготовления. При температуре выше  $20^\circ\text{C}$  жизнеспособность связующего сокращается. Оптимальными условиями проведения ремонтных работ, как и в работе по изготовлению пластмассовых конструкций, являются: температура воздуха  $18$ – $20^\circ\text{C}$  и относительная влажность воздуха  $65$ – $70\%$ .

При температуре воздуха до  $40^\circ\text{C}$  работы возможны, если обеспечить закрытые помещения необходимой вентиляцией и подготовить связующее небольшими порциями (до  $0,5 \text{ кг}$ ). При температуре  $10$ – $15^\circ\text{C}$  работы возможны лишь с последующим прогревом ремонтируемого участка при  $50^\circ\text{C}$  в течение 2–3 час. или при  $40^\circ\text{C}$  в течение 6–8 час. При температуре ниже  $10^\circ\text{C}$  необходимо над местом ремонта устраивать специальные помещения для создания необходимого микроклимата или использовать спрееконцепции связующих. Работа при относительной влажности воздуха свыше  $80\%$  ведет к получению некачественного материала.

Повреждения декоративного слоя восстанавливают затруднительно, так как сложно подобрать соответствующий колер покрытия. Воздух и поверхности расслоения устраниют, удалив отслоившиеся части и заформовав образовавшиеся плавики или приклеивая отслоившиеся части с помощью введения шприцем клея и полости воздуходувки.

Несквозные и сквозные повреждения и трещины заделывают, как показано на рис. 113.

Заделка пробоин или других сквозных повреждений пластмассовой конструкции может быть произведена с разделкой кромок или без разделки кромок обивки по контуру отверстия.

Порядок проведения заделки следующий:

- зачищают ремонтируемую поверхность;
- срезают поврежденную часть обшивки;
- разделяют (если нужно) кромки обшивки;
- устанавливают со стороны набора на отверстие заделку из фанеры, покрытую полизитиленовой пленкой;
- формируют наружную часть обшивки;
- удаляют заделку из фанеры, поверхность зачищают, обезжиривают и формируют внутреннюю часть обшивки.

Ремонт с разделкой кромок обшивки по контуру отверстия следует производить, если трещина обшивки более 6 мм.

Ремонт без разделки кромок производят в следующих случаях:



Рис. 113. Схемы заделки трещин: а — с разделкой кромок; б — без разделки кромок.

- 1) толщина ремонтируемой обшивки не превышает 6 мм;
- 2) наибольший размер отверстия не превышает 300 мм.

Заделку отверстий в обшивке при ремонте с разделкой кромок и накладками следует производить, как показано на рис. 114, а, без разделки кромок — как показано на рис. 114, б.

Размеры элементов заделки: при ремонте с разделкой кромок  $\delta_{\text{вн}}=0,20s$ ;  $\delta_{\text{вн}}=\delta_{\text{вн}}=0,25s$ ;  $b_{\text{вн}}=25s$ ;  $b_{\text{вн}}=80s+b_0$ ;  $b_{\text{вн}}=50s+b_0$ , при ремонте без разделки кромок  $\delta_{\text{вн}}=0,35s$ ;  $b_{\text{вн}}=200+b_0$ , где  $s$  — толщина обшивки;  $b_0$  — длина (ширина) зиреза.

Трещины в балках набора устраниют при соблюдении следующего порядка операций:

- зачистка ремонтируемых поверхностей;
- сверление по обеим концам трещины отверстий диаметром 12–15 мм;
- заполнение трещины и просверленных отверстий стекловолокном и связующим;
- приформовка накладок с обеих сторон трещины.

Размеры накладок (рис. 115): толщина  $\delta_{\text{вн}}=0,5s$ , длина  $l_{\text{вн}}=-35,5s+100l_0$ , где  $l_0$  — длина трещины.

Для устранения местных отслоений соединительных накладок, приформовок и угольников, а также лапок, скобок и пр. необходимо выполнять следующие операции:

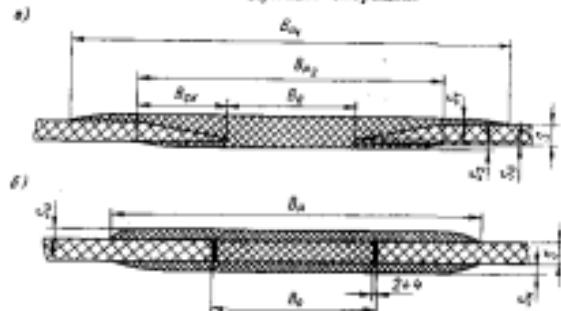


Рис. 114. Заделка отверстий в обшивке: а — с разделкой кромок; б — без разделки кромок.

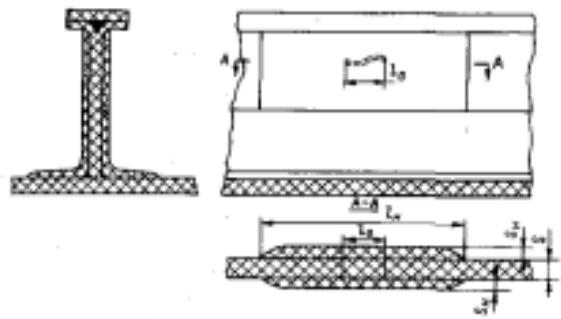


Рис. 115. Заделка трещин в стыке балок.

— срубить дефектные участки соединительных накладок, приформовок или угольников;

- зачистить ремонтируемые участки;
- приформовать новые накладки, угольники и т. д.

Размеры обформовочного поиска (рис. 116): толщина  $\delta_{\text{вн}}=0,35s$ , длина  $l_{\text{вн}}=50s+l_0$ , высота  $h=(0,7 \pm 0,8)H$ , где  $l_0$  — длина

участка с отслоенным покрытием балки;  $h$  — высота стеки балки.

Поврежденные соединительные накладки и уголники можно ремонтировать по схеме, показанной на рис. 117, при этом толщина и ширина новой накладки должны быть в 1,5 раза больше, чем у заменяемой. Ширина нового уголника должна быть в 1,3 раза больше ширины заменяемого уголника.

Балки набора, получившие в процессе эксплуатации излом, ремонту не подлежат, их необходимо заменить новыми.

Способ ремонта трехслойных конструкций и непосредственно технологический процесс следует выбирать в зависимости от ма-

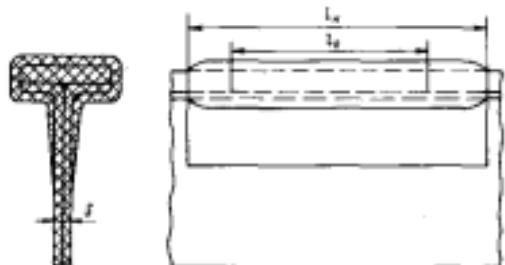


Рис. 116. Схема устранения местных повреждений (отслоений) покрытия балки.

териала, наружных слоев конструкций, размера пробоин. На рис. 118 приведены основные способы ремонта трехслойных конструкций с различными наружными слоями. Заделку отверстий, полученных при вырывании дефектных участков, следует производить аналогично заделке пробоин. Если имеется сквозной порез или трещина в одном из наружных слоев трехслойной конструкции, то устранение ее следует производить аналогично ремонту однослоиной конструкции с подобным дефектом. При этом пустоты в среднем слое заполняют крошкой из пенопласта со связующим.

Наряду с дефектами непосредственно корпусных конструкций встречаются, и очень часто, повреждения узлов присоединения к ним креплений насыщения, мелких фундаментов и арматуры.

К таким дефектам можно отнести:

— отрыв приформовок, соединяющих детали крепления насыщения с корпусными конструкциями;

— отрыв приформовок деталей крепления насыщения с поврежденной корпусной конструкцией, на которые установлены крепления;

— сдвиг и перекос металлических деталей, заформованных в стеклопластик;

— зарывание непрочности болтовых соединений и узлов присоединения деталей к корпусным конструкциям;

— срез болтов и снятие материала конструкции;

— срез резьбы и вырывание гнезда крепления насыщения и трехслойных конструкций.

Для решения вопроса о необходимости ремонта узлов присоединения к корпусным конструкциям деталей крепления (насыщения) можно руководствоваться следующим:

— недопустимы сдвиг и перекос металлических деталей, заформованных в стеклопластик;

— недопустимы отслоения по всему контуру приформовки независимо от глубины отслоения.

Дефектные приформованные детали крепления насыщения для проведения ремонта срывают, а затем снова устанавливают на место.

Детали насыщения на трехслойных конструкциях крепятся непосредственно специальными гнездами из формовочной массы.

При вырыве гнезда из трехслойной панели ремонт производится следующим образом:

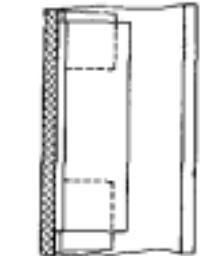
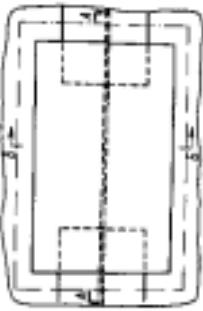
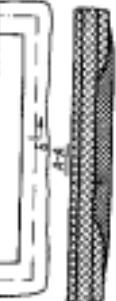


Рис. 117. Схема ремонта соединительных накладок (а), (б).



- вырезают участок панели с дефектом;
- ремонтируют конструкцию в соответствии с наложенной выше технологией заделки пробоин;
- устанавливают новые гнезда с креплением;

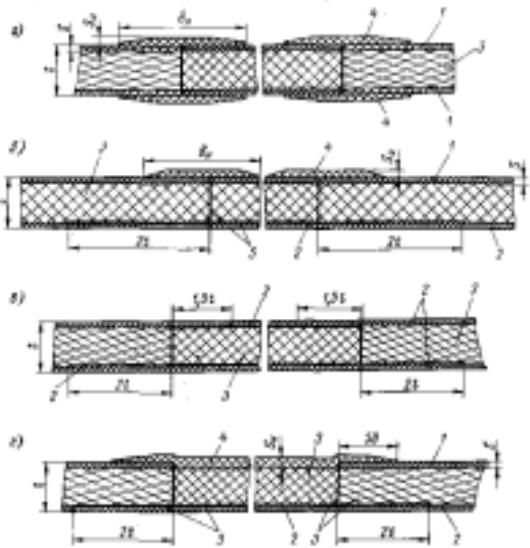


Рис. 118. Варианты схем ремонта трехслойных конструкций: а — заделка отверстий размерами (в плане) свыше 300 мм (наружные слои конструкции из стеклопластика); б — заделка отверстий размерами (в плане) свыше 300 мм (наружные слои комбинационные — стеклопластик к стеклопластик); в — заделка отверстий размерами (в плане) свыше 300 мм (наружные слои из эпоксидного пластика); г — заделка отверстий размерами (в плане) до 300 мм (наружные слои комбинационные — стеклопластик к стеклопластик); д — заделка отверстий размерами (в плане) до 300 мм (наружные слои из эпоксидного пластика); е — заделка отверстий размерами (в плане) до 300 мм (наружные слои из стеклопластика).

1 — стеклопластик; 2 — эпоксидный пластик (эмальст, гетинол); 3 — панель из стеклопластика; 4 — панель из эпоксидного пластика.

- при необходимости ставят дополнительное подкрепление. В процессе проведения ремонтных работ, естественно, появляется декоративный слой корпусных конструкций. Поэтому после завершения работ в случае необходимости должна быть произведена окраска. При этом предварительно следует

подготовить поверхность под окраску, т. е. полностью удалить старые покрытия. Удалить старую краску (или другое покрытие) можно при помощи механизированных щеток, деревянных или металлических щипалетов. Очистка должна производиться таким образом, чтобы избежать повреждения стеклопластика. Незначительные повреждения (глубиной до 1 мм) заделываются при помощи специальной шпаклевки. При окраске должны строго соблюдаться все технологические условия, применяться только утвержденные схемы окраски и не использовать материалы, отвечающие требованиям стандарта.

Возможность ремонтных работ в условиях эксплуатации судна следует определять исходя из:

- возможности обеспечения необходимых условий работы (температура воздуха, относительная влажность воздуха и т. п.);
- наличия необходимых материалов на судне;
- знания членами экипажа технологии ремонта и умения производить необходимые работы;
- объема работы.

Сроки ремонта пластмассовых конструкций, если нет необходимости в аварийном ремонте, приводятся к срокам ремонта основного корпуса.

стиков, неэффективность и практическая неограниченность источников сырья.

Для правильной оценки возможностей конструкционных пластмасс следует привести и некоторые недостатки их. Они в основном сводятся к следующему:

- низкая жесткость стеклопластика (модули упругости на коридок меньше, чем у стали);
- повышенная погрешность стеклопластика;
- зависимость прочности стеклопластика от времени и скорости деформирования;
- невысокая стойкость к истиранию;
- токсичность;
- низкий порог трещинообразования;
- нестабильность свойств материала в конструкции;
- сравнительно небольшой диапазон эксплуатационных температур (для современных стеклопластиков при длительном воздействии — не более 300° С).

При оценке эффективности внедрения в судостроение конструкций из новых материалов необходимо учитывать не только стоимость материалов, стоимость изготовления конструкций, эксплуатационные расходы, но и возможность улучшения тактико-технических данных судна, причем последнее в отдельных случаях может иметь определяющее значение.

Техническая целесообразность применения конструкционных пластмасс в современном судостроении обусловлена главным образом их эксплуатационными и некоторыми физико-механическими свойствами (табл. 42).

В настоящее время стоимость пластмассовых конструкций выше, чем деревянных и металлических. Основным фактором, удорожающим изготовление пластмассовых изделий, является высокая стоимость материалов (синтетических смол, стекловолокон и т. д.), которая обусловлена недостаточной освоенностью их промышленного производства. Следует отметить, что в странах с высокоразвитой промышленностью пластмасс стоимость полизифирных смол холодного отверждения приближается к стоимости сравнительно дешевых смол горячего отверждения. Так, например, в Италии полизифирные смолы всего в 1,5 раза дороже фенолных. Можно сказать, что в ближайшее время стоимость отечественных материалов для изготовления пластмасс снизится до уровня стоимости стали и дерева, так как исходные сырье для синтетических смол в стекловолоконами не является дефицитным. Пока стоимость пластмассовых материалов остается высокой, снижение стоимости конструкций из пластмасс осуществляется преимущественно за счет снижения трудоемкости их изготовления.

Практика показала, что трудоемкость изготовления из пластмасс даже таких сложных крупногабаритных конструкций, как

## Глава X

### ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИМСС В КОНСТРУКЦИЯХ НАСТРОЕК, РУБОК, ПЕРЕБОРОК

#### § 38. Общие положения

В настоящее время технический прогресс в той или иной отрасли производства немыслим без использования инженерных материалов.

Полимерные материалы и, в частности, конструкционные стеклопластики обладают рядом полезных свойств, среди которых прежде всего следует назвать следующие:

- высокая удельная (весовая) прочность;
- коррозионная стойкость;
- хорошие диэлектрические, тепло- и звукоизоляционные свойства;
- высокая демпфирующая способность;
- возможность создания материала с заданной анизотропией механических свойств;
- стойкость против воздействия биологических вредителей.

Процесс переработки пластмасс в изделия и конструкции выгодно отличается от процесса изготовления конструкций из таких материалов, как металлы, дерево и т. д. Вот некоторые из преимуществ:

- сравнительная простота оборудования и оснастки;
- снижение потребного количества единиц оборудования за одно изделие;
- сравнительно небольшое время подготовки производства при смене концептуации изделий, конструкций;
- многообразие и простота методов переработки стеклопластиков в изделия, конструкции;
- высокая производительность труда, возможная при применении некоторых методов (нанотка, напыление и т. д.);
- снижение потребной квалификации рабочих.

Можно назвать и такие положительные факторы, как высокая технологичность конструкций из армированных стеклопла-

Таблица 42

Сравнительные данные по физико-механическим свойствам дерева, металлов и стеклоакрилата.

Свойства материалов	Материалы		
	стекло	стекло-акрил ст. 4	стеклоакрил
Объемный вес, $\text{г}/\text{см}^3$	0,52	7,8	3,7
Механические свойства	Ненагнетен	Магнитен	Ненагнетен
Образование коррозионных организмов	Обрастает	Обрастает	Обрастает <sup>1</sup>
Сопротивление к коррозии	Не корродирует	Корродирует	Не корродирует
Влияние повышенных температур на механические свойства	Снижает до 22%	Не влияет	Снижает до 20%
Горючесть	Горят	Не горят	Не воспламеняется
Воздействие морской водяного пара	Разрушается	Не разрушается	Не разрушается
Воздействие агрессивных гидролизов	Поражается	Не поражается	»
Воздействие щелочей	До 150	Не воспламеняется	2
Воздействие кислот, %	Невосприимч	Невосприимч	Невосприимч
Водо-, бензо- и водоударостойкость	—	$11,5 \cdot 10^{-6}$	$29 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент линейного расширения, $\mu\text{рад}$	0,27	40-50	0,28
Коэффициент теплопроводности, $\text{вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$	0,14	—	—
Удельная теплоемкость, $\text{дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$	0,66	0,115	0,27
Удельные объемные деформации, $\text{мм}/\text{м}$	$2,1 \cdot 10^4$	—	$55 \cdot 10^{11}$
Удельные изогнутые - сопротивления, $\text{кг}$	$5,3 \cdot 10^4$	—	$1800 \cdot 10^4$
Скорость распространения звука, $\text{м}/\text{сек}$	3300	5100	2800
Электропроводящая способность, $\text{м}^{-1}$	—	27	12,5
при частоте 50 Гц	—	48	28
при частоте 500 Гц	—	—	—
Старение	Стареет	Стареет	Стареет

<sup>1</sup> Противление морским организмам залога растяжения.

2 Не 20 крат.

3 В кислотах уменьшается теплопроводность залога-покрытия, в щелочах не изменяется.

4 Удельные объемные и изогнутые сопротивления очень показаны для кристаллических природных отходов.

5 По отчету.

6 При изгибе листов 30 мм.

Ладдуканов

Свойства материала	Материал		
	стекло	стекло-акрил ст. 4	стеклоакрил
Влияние агрессивных сред на химические свойства:			
хорошая вода	Снижает до 30%	Не изменяет	Снижает до 20%
щелочное тесто	Снижает до 30%	»	» $> 20\%$
бензин, керосин	Снижает до 30%	»	» $> 10\%$
раствор щелочного калия	Разрушает	»	» $> 20\%$
концентрированная серная кислота	Сильно разрушается	Сильно разрушается	Сильно разрушается

конструкции корпуса судна, и несколько раз меньше трудоемкости изготовления этих же конструкций из стали, легких сплавов и дерева.

Технология изготовления любых конструкций из пластмасс включает такие трудоемкие операции, как сварка и правка после ковки, гибка профильного и листового материала, некоторые виды механической обработки и т. д. Трудоемкость изготовления пластмассовых конструкций может быть еще более снижена путем полного освоения производственного процесса и дальнейшего совершенствования технологии изготовления. В практике отечественного и зарубежного судостроения конструкции из пластмасс в основном изготавливаются методом контактного формования, где большой объем составляет ручной труда. Внедрение средств механизации позволит резко сократить трудоемкость изготовления пластмассовых конструкций.

Примерная оценка (в условных единицах) технико-экономических показателей изготовления рубок теплозода «Ракета» из пластмасс и алюминиевомагниевых сплавов приведена в табл. 43.

В каждом конкретном случае величина технико-экономических показателей может быть различной, и сама по себе она не дает полного представление об ожидаемой эффективности от применения пластмасс. Более полное представление об ожидаемой эффективности можно получить при сопраниении себестоимости конструкций из пластмасс и существующих материалов. При этом следует учитывать и степень влияния приведенных выше общих технико-экономических показателей (увеличение веса, увеличение срока службы и т. д.).

Таблица 44

**Технико-экономические показатели изготовления рубки теплохода «Ракета» из алюминиевомагниевых сплавов и стеклопластика (в условных единицах)**

Показатели	Материалы	
	стеклопластик	сталь коленки
Трудоемкость изготовления	1	5
Квалификация работ (ракеты)	1	3
Затраты на материалы	3—5	1
Необходимое количество производственных рабочих	6—7	14

Для определения ожидаемой эффективности от применения пластмасс могут быть использованы взятые из заводской практики данные о распределении затрат по отдельным статьям себестоимости.

1. Затраты на материалы в процентах от общей стоимости конструкции составляют для:

пластмассовых надстроек и рубок — 75—80%;

надстроек и рубок из алюминиевомагниевых сплавов 65—70%;

надстроек и рубок из стали — 30—35%;

пластмассовых переборок и выгородок — 80%;

переборок и выгородок из алюминиевомагниевых сплавов — 70%;

— переборок и выгородок из стали — 50%.

Цены на пластмассовые материалы имеют тенденцию к снижению в ближайшие годы, следовательно, удельный вес затрат на материалы в пластмассовых конструкциях будет снижаться. Исходя из этого при расчетах следует пользоваться перспективными ценами на пластмассы.

2. Трудоемкость изготовления пластмассовых надстроек и рубок составляет 15—20% от трудоемкости изготовления надстроек и рубок из алюминиевомагниевых сплавов и 60—65% от трудоемкости изготовления кадстрюк и рубок из стали.

Трудоемкость изготовления трехслойных пластмассовых переборок и выгородок из алюминиевомагниевых сплавов равна 20—25% от трудоемкости изготовления выгородок из стали.

#### § 40. Примерный порядок определения технико-экономической эффективности

Для иллюстрации приведенных выше положений рассмотрим порядок определения некоторых технико-экономических показателей на примере замены на одном из судов переборок и выгородок из металла пластмассовыми.

Металлические переборки были выполнены гофрированными. Элементы переборок показаны на рис. 119.

Основными предпосылками применения пластмасс в конструкциях переборок на этом судне послужили:

- уменьшение веса конструкций;

Таблица 44

**Весовые характеристики переборок, изготовленных из пластмасс и алюминиевомагниевых сплавов**

Конструкция переборок	Материал	Вес 1 м <sup>2</sup> , кг
Гофрированные полотница толщиной 2 мм	Стеклопластик	13,8 8,6
Однослойные конструкции с тремя наборами при толщине листа 2 мм и сечением набора $\frac{30 \times 5}{40 \times 3}$	Стеклопластик ТСП и ФСМ-1	18,6 12,0 16,5
Панели трехслойной конструкции при толщине наружных листов 2 мм и толщине заполнителя 10 мм	ТСП-ПХВ-ТСП ФСМ-ПХВ-ФСМ	24,0 18,6
Панели трехслойной конструкции при толщине наружных листов 1 мм и толщине заполнителя 16 мм	ТСП-ПХВ-ТСП ФСМ-ПХВ-ФСМ	17,0 12,0
Гофрированные полотница толщиной 1,5 мм	АМг	25,0
Гофрированные полотница толщиной 3,0 мм	АМг	50,0

\* Приведено вес 1 м<sup>2</sup> из переборки при ее высоте 2,3 м. Цифры в скобках указывают вес переборки, прилегающей к палубе (переборки с приваренными болтами).

— улучшение санитарно-гигиенического состояния помещений, выполненных с применением пластмасс;

— уменьшение цикла изготовления и монтажа конструкций;

— снижение трудоемкости изготовления и монтажа конструкций;

— коррозионная стойкость пластмасс к агрессивным средам и, как следствие этого, долговечность конструкций из них.

Весовые характеристики пластмассовых и металлических переборок приведены в табл. 44, где вес 1 м<sup>2</sup>, кг, из переборок

различных конструкций из пластика и металла взят с учетом веса комингсов.

Анализ весовых характеристик конструкций переборок из различных материалов позволил сделать следующие выводы:

1. Применение гофрированных полотнищ толщиной 2 мм из стеклопластика замены переборок такой же конструкции из АМг толщиной 1,5 мм дает экономию в весе:

- в случае присоединения переборок к стальным комингсам 45%;

- в случае присоединения переборок к палубе с помощью приформовки 65%.

2. Применение однослоиной конструкций с тавровым набором из стеклопластика при толщине листа 2 мм и сечении набора  $\frac{30 \times 5}{60 \times 3}$  взамен гофрированных переборок из АМг при толщине из 1,5 мм дает экономию в весе:

- 25% в случае изготовления полотнищ из стеклопластика и крепления переборок к комингсам;

- 45% в случае применения для изготовления переборок стеклопластика и крепления к палубе приформовкой;

- 30% в случае изготовления полотнищ переборок из ТСП или ФСМ-1.

3. Весовые характеристики трехслойных панелей с наружными листами толщиной 2 мм и гофрированными из АМг толщиной 1,5 мм в случае применения для крепления тюх и других комингсов практически одинаковые. Если же присоединение переборки из панелей к палубе осуществляется приформовкой, то вес переборки уменьшается на 20%.

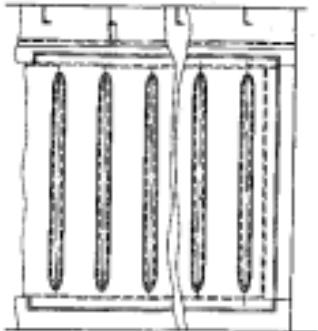
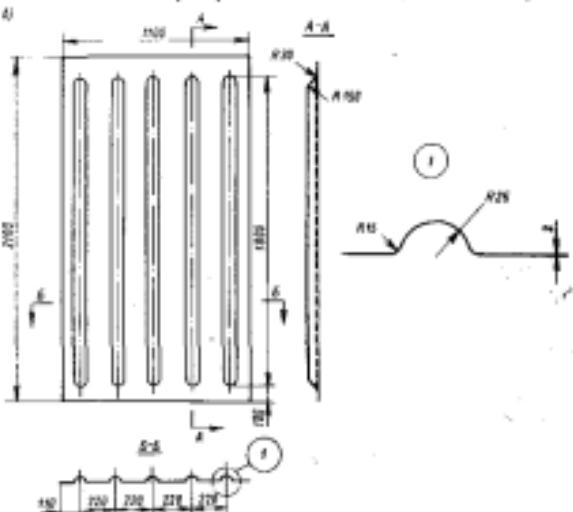


Рис. 118. Конструкции переборок

4. Замена переборок из АМг толщиной 1,5 мм панелями при толщине наружных листов 1 мм дает экономию в весе:

- 25% в случае применения комингсов;
- 45% в случае применения приформовки.

5. Уменьшение веса переборок в случае применения пластмасс может быть еще значительнее, например при необходимости замены металлических переборок, а также при замене пластмассовыми переборками из АМг толщиной 3 мм.



а — металлическое; б — пластмассовое.

Применение пластмассовых материалов взамен металлических в конструкциях переборок и выгородок влечет за заменение следующих статей расходов:

- затраты на сырье и материалы;
- затраты на основную и дополнительную заработную плату и начисления;
- затраты на оснащение и организацию участка подготовки и монтажа пластмассовых переборок;
- затраты на эксплуатационные расходы по содержанию и профилактическому ремонту установленных переборок.

Стоимость материалов, применяемых при изготовлении переборок и выгородок в пластмассовом и металлическом исполнении, приведена в табл. 45.

Таблица 45

Стоимость материалов, применяемых при изготовлении пластмассовых и металлических переборок

Материал	Расчетная единица, шт.	Стоимость расчетной единицы, руб.
Стеклопластик поливного отверстия толщиной 2 мм	10	18,8
ТСП	10	11,0
ФСМ-1	10	10,0
Пенопласт ПЛВ-1	10	17,0
Каменная композиция К-150 и др.	1	4,0
АМг	10	12,0

Стоимость материалов, необходимых для изготовления переборки:

1) гофрированной из стеклопластика толщиной 2,0 мм — 15,7 руб.;

2) из стеклопластика толщиной 2,0 мм с тавровым забором  $\frac{30 \times 5}{60 \times 3}$  — 23,6 руб.;

3) из ТСП или ФСМ-1 толщиной 2,0 мм с тавровым забором из стеклопластика  $\frac{30 \times 5}{60 \times 3}$  — 16,4 руб.;

4) трехслойной конструкции толщиной 22,0 мм — 26,5 руб.; толщиной 20,0—18,0 руб.;

5) гофрированной из АМг толщиной 1,5 мм — 22,0 руб.; толщиной 3,0 мм — 48 руб.

Тогда экономия на 1 м<sup>2</sup> и составит:

— при замене гофрированных переборок из АМг толщиной 2,0 мм на гофрированные из стеклопластика той же толщины — 6,3 руб.;

— при замене переборок из АМг толщиной 1,5 мм на переборки из трехслойных панелей с наружными листами толщиной 1 мм — 4,0 руб. (с наружными листами толщиной 2,0 мм произойдет удешевление на 4,5 руб.);

— при замене гофрированных переборок толщиной 3,0 мм из АМг на переборки трехслойной конструкции — 21,5 руб.

По данным завода трудоемкость изготовления и установки металлических переборок из АМг по операциям технологического процесса 10 нормо-час. Стоимость 1 нормо-часа с учетом

надбавок расходов 1,6 руб., стоимость изготовления 1 м<sup>2</sup> и переборок составляет  $10 \times 1,6 = 16$  руб.

Приведем затраты на изготовление и монтаж пластмассовых переборок в зависимости от их конструции.

Трудоемкость изготовления (в нормо-часах) из стеклопластика 1 м<sup>2</sup> и переборок гофрированной конструкции толщиной 2,0 мм слагается из следующего:

изготовительные работы	раскрой сырья	1,0
	приготовление связующего	0,8
	приготовление окраинного связующего	0,1
	изготовление разделительного слоя (2 раза)	0,6
основные работы		
	изготовление зazorчатого слоя	0,1
	формование	1,9
	обрезка заштакика	0,25

Итого 4,35  
нормо-часа

Трудоемкость изготовления (в нормо-часах) 1 м<sup>2</sup> и переборок трехслойной конструкции изолонировано будет выглядеть так:

разметка и резка панелей	0,9
изогнутая гибелька с учетом переборки	1,4
разметка и резка наружных листов	0,8
зачистка краев листов по сдвоенному склеиванию	1,8
склеивание	1,9

Итого 6,8  
нормо-часа

Трудоемкость (в нормо-часах) процесса изготовления 1 м<sup>2</sup> и переборки из стеклопластика с забором

разметка и резка панелей	0,3
разметка и зачистка мест установки забора	0,25
склейка листов в зazorчатые	0,4
изогнутое склеивание забора	2,6
установка забора	1,0

Итого 4,35  
нормо-часа

## Трудоемкость (в нормо-часах) монтажа 1 пог. м переборок

причечивание переборки по месту с перекоской . . . . .	0,6
зачистка склеиваемых поверхностей . . . . .	0,5
противоскользящий клей . . . . .	0,1
наклейка дилла . . . . .	0,5
подготовка прижимного края . . . . .	0,3
установка и привинт переборки . . . . .	0,6

Итого 2,6  
нормо-часа

Таблица 46  
Трудоемкость и стоимость работ по изготовлению и монтажу пластмассовых и металлических переборок

Наименование конструкции	Трудоемкость, нормо-часы			Стоимость, руб.	
	металл. дилл	пластик	обивка	нормо- часы	общая
Гофрированные переборки из АМг толщиной 1,5 мм без обивки	—	—	10	1,6	16
Гофрированные переборки из стеклопластикса толщиной 2 мм	4,35	2,60	6,85	0,9	6,36
Пластмассовые переборки с набором	4,55	2,60	7,15	0,9	6,43
Переборки трехслойной конструкции	5,80	2,60	9,40	0,9	8,46

Итоговые данные для сравнения сведены в табл. 46 и 47. Поскольку в настоящее время большинство судостроительных заводов не имеет специальных участков по изготовлению пластмассовых деталей, определить хотя бы ориентировочные затраты, необходимые для его организации и оснащения.

Стоимость оснащения участка состоит из:

— стоимости стационарного оборудования (сверлильный станок, ленточная, лисковая дилла, верстак и т. д.). Ориентировочно, из расчета 9 единиц оборудования по 2000 руб. за единицу, общая его стоимость составляет 18 тыс. руб.;

— стоимости оснастки. Ориентировочно она определена из расчета 5 тыс. руб. на одно рабочее место и составляет  $3 \times 5 = 15$  тыс. руб.;

— стоимость прочего нестандартного оборудования и оснастки участка в количестве 10 единиц. Приближенно она определяется из расчета 300 руб. за единицу и составляет  $10 \times 300 = 3$  тыс. руб.

Таблица 47  
Стоимость пластмассовых и металлических переборок

Наименование конструкции	Стоимость ма- териала и жесткости		Обща- ясто- имость руб.
	нормо- часы	руб.	
<b>Гофрированные переборки из АМг:</b>			
толщиной 1,5 мм	22,0	10,0	220
+ 3,0 мм	48,0	16,0	640
Гофрированные переборки из стеклопластикса толщиной 2 мм	15,7	6,85	21,85
<b>Пластмассовые переборки с набором из:</b>			
стеклопластикса	23,6	7,15	33,05
ТСП	16,4	6,43	22,83
<b>Переборки трехслойной конструции:</b>			
толщиной 22 мм	26,5	9,40	34,90
+ 30 мм	18,0	8,46	26,46

Стоимость всего оборудования и оснастки участка составляет  $18 + 15 + 3 = 36$  тыс. руб. Стоимость монтажа оборудования равна 10% от его стоимости, или 3,6 тыс. руб. Округленно полная стоимость оснащения и оборудование участка составляет 40 тыс. руб.

Необходимо отметить, что в основном все стационарное оборудование, которое требуется для механической обработки пластмассовых материалов в конструкциях, на судостроительных заводах имеется и может быть использовано без дополнительных затрат.

Таким образом, стоимость оснащения и оборудования участка соответственно снижается (в нашем случае на 50%).

Принимая среднюю экономию от замены 1 пог. м переборок из АМг (толщиной 1,5 мм) на пластмассовые толщиной 9,8 руб.,

получим, что организация, оборудование и оспашение участка полностью окупается после установки  $\frac{39\,000}{9,8} = 2000$  лож. м пластмассовых переборок.

Экономическая эффективность применения пластмассовых материалов в конструкциях судовых переборок еще более повысится при учете необходимости зашивки и отడики металлических переборок и больших затрат на содержание и ремонт при эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абдабов А. Д. Исследование в области изготовления трехслойных конструкций с легкими промежуточными заполнителями. М., «Машгиз», 1964.
2. Абрамян Г. К. Общие уравнения трехслойных некомпактных оболочек с легким промежуточным заполнителем.— В сб.: Теория оболочек и пластик. Ереван, АН Арм. ССР, 1964.
3. Александров А. Я. и др. Расчет трехслойных панелей. М., Оборонгиз, 1960.
4. Александров А. Я. и др. Конструкция с заполнителем из пенопласта. М., Оборонгиз, 1962.
5. Александров А. Я. и Трофимова З. П. Определение трехслойных упругих параметров сетчатых законченных трехслойных панелей.— В сб.: Вопросы расчета линейных линзовидных конструкций. М., Оборонгиз, 1959.
6. Альшев И. М. Полиэфирные сплавы пластичности для судостроения. Л., «Судостроение», 1964.
7. Андреевская Г. Д. Восстановление оцинкованных стальных конструкций. М., «Наука», 1966.
8. Аргунгелатин В. А. Пластичные массы. Справочник засобов. Л., Судостроение, 1961.
9. Асламазов М. С. и др. К вопросу о повышении ударной изгибайшей жесткости стеклопластиков за счет применения белого стекловолокна.— «Макетика подвижников», 1966, № 3.
10. Бельский В. Л. и др. Конструкции летательных аппаратов. М., Оборонгиз, 1968.
11. Бердянская И. П. Клин и склизывание. Киев—Москва, Машгиз, 1962.
12. Берсуский В. Е. и др. Прямоизогнутые сетчатые конструкции. М., «Машгиз», 1966.
13. Бодянка Б. В. О линейной архитектуре морских и речных судов.— «Судостроение», 1954, № 5.
14. Войцех Г. В., Нейфилд В. М. и Таубин Г. О. Прочность сетчатых конструкций по алюминиевым сплавам. Л., Судостроение, 1962.
15. Войцех Г. В. Расчет прочности пандусов, имеющих сложный

- вих изокривленных сечений.—Сб. НТД судостроительной промышленности, 1961, № 40.
38. Брюкнер Л. Э. Некоторые варианты упрощения уравнений изгиба трехслойных пластин.—В сб.: Расчеты элементов аэродинамических конструкций. М., «Машиностроение», 1965.
37. Брюкнер Л. Э. Приближенное решение некоторых задач проектирования изгиба трехслойных пластин с волнистыми наполнителями.—В сб.: Вопросы расчета элементов аэродинамических конструкций. М., «Обориздат», 1969.
38. Быковский В. Н. Клей в строительных конструкциях. М., Госстройиздат, 1968.
39. Быковский В. Н. и Соколовский Б. С. Деревянные клеевые конструкции. М., Маштрактиздат, 1969.
40. Полоцкий В. И. и Зубрицкий В. В. Аэродинамический облик современного морского судна.—«Судостроение», 1964, № 10.
41. Вопросы расчета элементов гиперболических конструкций. Вып. I—2. М., Обориздат, 1968.
42. Бондарев С. С. Сэндвичевым (гуттапером) высокодавлением и его влияние на производство обуви и заменителей кожи.—«Легкая промышленность», 1953, № 1.
43. Временные требования к постройке судов внутреннего плавания из пакетов. М., «Транспорт», 1966. (Регистр РСФСР).
44. Газиков Б. Г. Об основных уравнениях трехслойных пластин и оболочек.—«Исследование по теории пластин и оболочек», 1964, вып. 2.
45. Газиков Б. Г. К теории изгиба многослойных оболочек.—Изв. ВУЗ, «Авиационная техника», 1969, № 4.
46. Газиков Б. Г. и Муштарин Х. Я. К теории трехслойных пластин и оболочек.—«Исследование по теории пластин и оболочек», 1964, вып. 2.
47. Голубев К. С. Некоторые вопросы прочности трехслойных пластин с легким промежуточным наполнителем.—Изв. ВУЗ, «Авиационная техника», 1969, № 2.
48. Григорьев Э. И. Конструктивные проблемы трехслойных оболочек с жестким наполнителем.—Изв. АН СССР, ОТИ, 1968, № 1.
49. Григорьев Э. И. Уравнения трехслойных оболочек с жестким заполнителем.—Изв. АН СССР, ОТИ, 1967, № 1.
50. Григорьев Э. И. О выборе изгибаемой поверхности в теории неизогнувшихся оболочек.—Изв. АН СССР, ОТИ, 1966, № 8.
51. Губенко А. Б. Клейкие деревянные конструкции в строительстве. М., Госстройиздат, 1957.
52. Губенко А. Б. Клейкие конструкции из лесом. М., Стройиздат, 1949.
53. Губенко А. Б. Клейфактурные конструкции (проектирование и изготавливание). М., 1949 (Госиздат СССР. Ин-т полиграфии, издачения «ИТЕЗИН», № 37).
54. Губенко А. Б. и др. Прочность и деформативность конструкций с применением пластика. М., Стройиздат, 1966.
55. Данченко Р. Н. Архитектурные формы речных судов.—«Судостроение», 1962, № 31.
56. Дерягин Б. В. и Кротова Н. А. Аникин М.—Л. Изд-во АН СССР, 1949.
57. Дмитриев П. А. Опыт применения листовых конструкций в строительстве. Новосибирск, Обла. науч.-техн. изд-во, 1968.
58. Добкин В. В. Развитие новых методов архитектурного проектирования судов.—«Морской флот», 1960, № 10.
59. Ильин Ю. М. Определение ящущей способности деревянных конструкций методом ЦНИИПС. М., Стройиздат, 1963.
60. Ильин Ю. М. Определение ящущей способности деревянных конструкций судов.—«Судостроение», 1962, № 4.
61. Исследование конструкционных пластмасс в строительных конструкциях из их основе (СБ. статей). Под ред. А. В. Губенко. М., Госстройиздат, 1962.
62. Изучение свойств сотовых пластиков.—«Малаярка полимеров», 1966, № 8.
63. Кабаков В. В. Устойчивость круговой трехслойной аэродинамической оболочки при неоднородном сжатии.—Изв. АН СССР, 1964, № 4.
64. Кадиначев А. П. Некоторые вопросы прочности деревянных сендвичевых элементов судовых конструкций. Автореферат докторской, 1963.
65. Кадиначев А. П. О некоторых особенностях деревянных сендвичевых.—«Судостроение», 1966, № 1.
66. Кадиначев А. П. Влияние материалов стеклодвигателей на ящущую способность из сендвичей.—«Судостроение», 1964, № 8.
67. Кадиначев А. П., Порохов Б. Ф. О прочности kleевых сендвичей.—«Судостроение», 1968, № 5.
68. Кадиначев А. П., Порохов Б. Ф. Исследование работы kleевых сендвичей.—«Судостроение», 1963.
69. Кад С. Н. Строительство пакетных оболочек. М., «Машиностроение», 1966.
70. Карапанов В. Ф. Уравнение податки трехслойных оболочек с легким промежуточным заполнителем при изгибах и изогибах.—Изв. ВУЗ, «Авиационная техника», 1968, № 1.
71. Карапанов В. Ф. Особенности трехслойных оболочек с легким наполнителем.—Изв. ВУЗ, «Машиностроение», 1968, № 6.
72. Карапанов В. Ф. О выборе сендвича при проектировании крыши с трехслойной оболочкой.—«Авиационная промышленность», 1966, № 6.
73. Карапанов В. Ф. Теория податки. М., Изд-во АН СССР, 1958.
74. Каражинская В. П. О выборе сендвича заполнителя при проектировании крыши с трехслойной оболочкой.—«Авиационная промышленность», 1966, № 6.
75. Каражинская В. П. Теория податки. М., Стройиздат, 1965.
76. Клеин Г. Я. Искусственные конструкции из пластика. М., Стройиздат, 1967.

99. Тарнопольская Ю. М. и Скудра А. М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига, «Зинатне», 1966.
100. Тимошенко С. П. Теория упругости. Л.—М., ОГИРН, 1937.
101. Тимошенко С. П. и Войновская-Кригер С. Пластины и оболочки. И., Физматлит, 1958.
102. Фрейдик А. С. и Нозокрененов П. П. О долговечности склеиваний из клеев различной структуры. —«Механика полимеров», 1966, № 3.
103. Хаффман Дж. В. и Лакакона Ф. П. Переиздание материалов для оболочек толстыми боковыми ресс. — ВРТ, 1966, № 9.
104. Хартель Г. Тонкостенные конструкции. М., «Металлостроение», 1965.
105. Хрулев В. М. Испытание фанеры. М.—Л., Госстройиздат, 1960.
106. Хрулев В. М. Прочность и долговечность kleenov склеиваний в строительных конструкциях к детали. М., Госстройиздат, 1961.
107. Хрулев В. М. Упрощенный способ определения склеек фанеры. —«Строительство», 1958, № 2.
108. Шиманский Ю. А. Сборник статей по судостроению. Л., Судостроение, 1954.
109. Шиманский Ю. А. Проектирование программы стапелей судового корабля. Л., Судостроение, 1949.
110. Экспресс-информация «Аэронавтика и ракетодинамика», 1965, № 14.
111. Экспресс-информация «Аэронавтика и ракетодинамика», 1966, № 19.
112. Экспресс-информация «Аэронавтика и ракетодинамика», 1966, № 20.
113. Эйткен Г. Словарь аэрокосмика. М., Оборониздат, 1958.
114. Якубова Л. С. Задачи оптических стекол от газового раздувания. М., Оборониздат, 1958.
115. Buckleysian J. Society Chemical, 1941, 68.
116. Graf O., Egger K. Holz als Roh—und Werkstoff, 1958.
117. De Bruyne N. A. Acta metallurgica Technical Notes, 1947, 53.
118. De Bruyne N. A. Aircraft Engineering, 1944, 16, 115.
119. De Bruyne N. A. and Hoewink R. Adhesives and Adhesives. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1951.
120. Dietz A. G. Engineering Laminates, 1949.
121. Frey K. Schweizer Archiv für Angewandte Wissenschaft und Technik, 1953, 19.
122. Goland N. and Reissner E. J. Applied Mechanics, 1944, 11, 417.
123. Granholm H. On Composite Beams and Columns Chalmers University Technology Gothenburg, 1949.
124. Lubkin J. L. and Reissner E. Trans. ASME, August, 1956, 78, 1253.
125. Lubkin J. L. Final Report on Contract NORD 13388, Midwest Research Institute, September, 1953.
126. Müller H. Fertigungstechnik und Betrieb, 1961, 1, 2.
127. Müller H. Plaste und Kunststoffe, 1961, 7.
128. Mylonas C. Ph D Thesis, London University, 1949.
129. Mylonas C. Report of Progress in Physics, 1949, 12.
130. Neit van der. Die statische geschichtete Stiele Streifen. National Luchtvaartlaboratorium Amsterdams Bericht, October, 1943.
131. Perny H. A. Product Engineering, 1958, 37.
132. Plantena F. J. Report 1951. National Luchtvaartlaboratorium, Amsterdam.
133. Shaffer und Trischler. Plaste und Kunststoffe, 1956, 6.
134. Spies G. S. Aircraft Engineering, 1953, 35, 389.
135. Volkersen O. Luftfahrt-Forsch, 1938, 15, 41.
136. Winter Mecklenburg. Industrie—Anzeiger, 1961, 23.
137. Wittrick W. H. Howard W. Anstrat J. Scientific Research, 1948, 1.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

От авторов	3
<b>ГЛАВА I</b>	
Классификация легких судовых конструкций и требования, предъявляемые к ним	
§ 1. Легкие судовые конструкции	5
§ 2. Аналisis требований к легким переборкам	7
<b>ГЛАВА II</b>	
Основные приемы винилка в легких судовых конструкциях	
§ 3. Изготовление легких судовых конструкций из пластика	22
§ 4. Результаты испытаний и эксплуатации	33
<b>ГЛАВА III</b>	
Пластиком, применяемым для изготовления легких судовых конструкций	
§ 5. Общие сведения	46
§ 6. Синтетические виниловые отверждения	49
§ 7. Пластины из основе эпоксидного горячего отверждения	53
§ 8. Материалы для изготовления тревелейных конструкций	58
<b>ГЛАВА IV</b>	
Соединение винилка между собой и с другими материалами	
§ 9. Составы покрытий	65
§ 10. Пластико-конструированные соединения материалов на липкую способность их субстанций	68
§ 11. О внутренних напряжениях в соединении стекловолокна	73
§ 12. Прочность стыковых kleевых соединений при растяжении—сжатии	77
§ 13. Прочность стыковых kleевых соединений при изгибе	95
§ 14. Специфика работы тябровых (алк уловых) kleевых соединений при отрыве	99
§ 15. Специфика работы тябровых (алк уловых) kleевых соединений при изгибе	105
§ 16. Другие способы соединений	111
<b>ГЛАВА V</b>	
Особенности конструирования пластиковых надстроек, рубок, переборок	
§ 17. Обзор положения	114
§ 18. Выбор материала	115
§ 19. Стены в конструкции палуб, надстроек, листы переборок	118
§ 20. Балки набора	123

## ГЛАВА VI

### Прочность пластиковых легких судовых конструкций

§ 21. Общее понятие	126
§ 22. Общая прочность	129
§ 23. Испытания прочности	135

## ГЛАВА VII

### Особенности проектирования трехслойных конструкций

§ 24. Составы покрытия	143
§ 25. Зависимости теории расчета трехслойных правоугольных панелей с легким промежуточным слоем	145
§ 26. Цилиндрический изгиб трехслойной пластины	151
§ 27. Стена работы советского зодчего в трехслойной конструкции	175
§ 28. Теоретические приведенные характеристики сотового материалов	179
§ 29. Особенности испытаний отрывом зондирующей палочки в панели с ячеями	187
§ 30. Конструктивное оформление сотовой трехслойных панелей	191

## ГЛАВА VIII

### Изготовление пластиковых легких судовых конструкций

§ 31. Основные способы изготовления	197
§ 32. Технология изготовления	203
§ 33. Монтажно-скрепочные работы	221
§ 34. Механическая обработка пластика	228
§ 35. Контроль качества	229
§ 36. Техника безопасности в отраве труда при изготовлении из пластиковых судовых конструкций	227

## ГЛАВА IX

### Ремонт пластиковых конструкций

§ 37. Характеристика основных дефектов в способах их переделки	232
§ 38. Способы выполнения ремонтных работ	235

## ГЛАВА X

### Оценка технико-экономической эффективности применения пластика в конструкциях надстроек, рубок, переборок

§ 39. Обзор пластика	242
§ 40. Практический портфель определения технико-экономической эффективности	246
Литература	265