

Введение Как известно [1 – 6], композиционные материалы (КМ) на базе смол семейства Norpol Dion могут эффективно использоваться в качестве коррозионно устойчивого конструкционного материала при проектировании элементов оборудования для химических отраслей промышленности. В частности, смола марки Norpol Dion – 9100, а также изготовленный на основе этой смолы стеклопластик АКПЭС – 9100 характеризуются высокой антикоррозионной стойкостью и стабильностью своих физико-механических свойств в условиях воздействия сернистого газа при температурах до 110 – 120 °C [7]. Это даёт основания рекомендовать данный КМ для использования в качестве защитного химстойкого слоя при реконструкции оборудования сернокислотных производств. Конструктивно изделия из КМ обычно выполняются в виде многослойных ламинатов. Внешний (силовой) слой целесообразно выполнять из смол химически менее стойких, но с лучшими физико-механическими свойствами или более дешевых. Распределение напряжений в конструкциях из КМ определяется, помимо условий нагружения и исполнительных размеров, также характеристиками самого материала и технологией изготовления изделия (ориентация армирующего волокна, угол намотки стеклоровинга, число слоев намотки, тип наполнителя и связующего и т.д.). При этом приходится принимать во внимание динамические процессы, которые происходят со смесью в процессе изготовления и отверждения изделия. Эти обстоятельства должны учитываться при конструировании изделий из композиционных материалов [8]. Для изделий, имеющих форму оболочек вращения, что характерно для химических отраслей промышленности, при расчете конструкций из КМ представляется возможным использование обычных расчетных уравнений, полученных для упруго-пластичных материалов (металлов) на основе теории оболочек, но с введением параметров, учитывающих особенности работы КМ. Для слабо нагруженных оболочек наиболее часто в качестве такого параметра принимается отношение модулей упругости сравниваемых материалов (металл – стеклопластик), характеризующих жесткость конструкции. В этом случае исполнительная толщина изделия принимается из условия [9 – 11]:
$$t = \sqrt{\frac{S}{E \cdot n}} \quad (1)$$
 где S – расчетный размер конструкции, E – модуль упругости материала, n – коэффициент запаса, индексы «пл» и «ст» характеризуют соответственно композиционный материал и сталь. Известно, что для цилиндрических тонкостенных оболочек вращения в случае нагружения внутренним газовым давлением кольцевые напряжения в два раза превышают меридиональные. Поэтому для металлических конструкций во многих случаях прочность в продольном направлении оказывается чрезмерно завышенной. При использовании КМ у конструктора появляется возможность формировать структуру материала таким образом, чтобы в окружном направлении количество армирующих волокон, определяющих прочность материала, было больше, чем в продольном. За счет этого удастся достигать относительной равнопрочности конструкции в обоих направлениях. При

расчетах несущей способности конструкции толщина защитного слоя обычно не учитывается, т.е. этот слой выступает в качестве конструктивной прибавки на коррозию к расчетной толщине стенки изделия. Изделия из стеклопластиков имеют одну принципиальную особенность: компоненты композиционного материала соединяются друг с другом в процессе изготовления изделия, что в значительной мере и определяет условия работы изделия при нагружении. Большое влияние на прочностные свойства стеклопластика оказывают такие параметры технологического процесса формования, как постоянство соотношения долей смолы и наполнителя, степень пропитки материала связующим, степень уплотнения и отверждения композиции, величина захвата воздуха смолой в процессе изготовления изделия (например, намоткой). Как показывают данные фирмы-изготовителя смол [12], в качестве материала силового несущего слоя целесообразно использовать стеклопластик на основе смолы марки Norpol 420 – М 750. Данный материал относится к группе жестких конструкционных смол и характеризуется повышенными прочностными свойствами, но, к сожалению, – и пониженной химической стойкостью, в том числе и в среде сернистых соединений. Поэтому этот КМ может использоваться в качестве конструкционного материала только при условии наличия защитного коррозионностойкого слоя. Однако сведения о физико-механических характеристиках данного материала поставщик приводит в ограниченном объеме, причем эти данные получены при испытаниях образцов ламината толщиной только 5 мм и для некоторого закреплённого соотношения связующее – наполнитель. Этих данных недостаточно для обоснованного проектирования изделий из рассматриваемых материалов, в связи с чем в данной работе было проведено исследование основных физико-механических свойств стеклопластика на основе смолы Norpol 420 – М 750 с целью оценки возможности его практического использования для изготовления дымоходов в производстве серной кислоты, подвергаемых воздействию химически активных рабочих сред. Экспериментальная часть Образцы для исследования физико-механических свойств в настоящей работе изготавливались методом ручного контактного формования с постепенным набором толщины, когда на слой связующего, нанесенный на поверхность матрицы, выкладывали слой стекломата, пропитывали его смолой и прикатывали валиком для уплотнения материала и удаления пузырьков воздуха. После этого аналогичным образом укладывался и пропитывался следующий армирующий слой в виде стеклоткани. Так формировался лист ламината заданной структуры и толщины. В последующем из него вырезались образцы требуемой конфигурации для проведения испытаний. При изготовлении образцов использовались: стекломат марки М 601-450, стеклоткань RT 500 и связующее на основе полиэфирной смолы Norpol 420 – М 750. Ламинат содержал 5, 10, 15 и 20 слоёв стекломата и соответственно 4, 8, 12 и 16 слоёв стеклоткани. Общая толщина ламината составляла от 5,1 до 23,3 мм.

Число образцов для испытаний по каждой серии толщин принималось не менее пяти. Форма и размеры испытываемых образцов стеклопластика определялись требованиями стандартов [13 – 14], в соответствии с которыми производились экспериментальные исследования и статистическая обработка полученных результатов. Структура и основные физические характеристики исследованных образцов приведены в табл. 1. Таблица 1 – Усреднённые характеристики ламината в зависимости от его структуры

Структура ла-мината*	Толщина, мм	Плотность, кг/м ³	Содержание стекла, %	Пористость, %	масс. объем.
5M+4T	5,1	1,529	46,5	63,4	4,11
10M+8T	11,1	1,572	47,9	64,3	3,13
15M+12T	15,1	1,631	43,2	61,6	3,32
20M+16T	23,3	1,567	45,5	62,7	3,93

Примечание*: В первом столбце в условном обозначении структуры композиционного материала указано число слоев стекломата М 601–450 (М) и числа слоев стеклоткани РТ–500 (Т) соответственно. Как следует из представленных данных, наиболее плотная структура ламината достигалась для ламината толщиной от 10 до 15 мм, содержащего от 8 до 12 слоёв стеклоткани (Т). В этом случае достигалась наибольшая плотность и наименьшая пористость материала. Очевидно, именно в пределах этих толщин создаются наиболее благоприятные условия для получения малопористой, монолитной структуры композита. На рис. 1 – 2 и табл. 2 показаны зависимости основных физико-механических характеристик исследованных образцов стеклопластика от их структуры и условий испытания. На этих же рисунках нанесены точки, соответствующие паспортным данным исследуемого материала (данные поставщика смолы [12]).

Рис. 1 – Зависимость пределов прочности исследуемого стеклопластика от структуры ламината и условий нагружения: ▲ – сжатие; ◆ – растяжение; ■ – изгиб; ■ – данные поставщика (растяжение); ● – данные поставщика (сжатие)

Рис. 2 – Зависимость модуля упругости исследуемого стеклопластика от структуры ламината и условий нагружения: ▲ – сжатие; ◆ – растяжение; ■ – изгиб; ■ – данные поставщика (растяжение); ● – данные поставщика (сжатие)

Таблица 2 – Зависимость твердости и теплостойкости исследуемых образцов от структуры (толщины) ламината

Толщина стеклопластика, мм	5,1	11,1	15,1	23
Поверхностная твердость, МПа	183	178	178	173
Теплостойкость, °С	143	142	144	143

Обсуждение результатов исследования Как показывают результаты исследования, физико-механические характеристики испытанных образцов в основном соответствуют паспортным данным, приведенным на этот материал поставщиком смолы. Так, предел прочности при растяжении, определенный в результате настоящего исследования, находится в пределах от 136 МПа (толщина образца – 5,1 мм) до 145 МПа (толщина 15,1 мм). По данным поставщика эта характеристика составляет 130 МПа (толщина 5 мм). Предел прочности при изгибе по данным испытаний находится в пределах 166 – 198 МПа, что несколько ниже паспортных данных (220 МПа для ламината толщиной 5 мм). Предел прочности при сжатии лежит в пределах 220 – 269 МПа. Упруго-

деформационные характеристики исследованного материала (модули упругости) составили для ламинатов различных толщин соответственно 10,1 – 13,1 (растяжение), 8,0 – 8,7 (изгиб) и 5,5 – 6,05 (сжатие) ГПа. Эти значения также находятся в хорошем соответствии с данными, приводимыми поставщиком материала. Обращает на себя внимание выраженная зависимость основных физико-механических характеристик от структуры ламината (рис. 1 – 2). Так, пределы прочности ламината для всех схем нагружения с ростом числа слоев армирования сначала возрастают, а затем при достижении некоторого предела (12 слоев стеклоткани при общей толщине образца 15,1 мм) рассматриваемые характеристики начинают уменьшаться (рис. 1). Аналогичные зависимости характерны и для показателей модулей упругости (рис. 2) и ударной вязкости. Представляется, что в данной области толщин создаются наиболее благоприятные условия для протекания экзотермического процесса отверждения связующего, что в свою очередь способствует получению качественной монолитной структуры композита. Степень отверждения связующего, контролируемая по изменению поверхностной твердости композита, практически не зависит от структуры стеклопластика (табл. 2): значение поверхностной твердости образцов изменялось в достаточно узких пределах (от 173 до 183 МПа), что свидетельствует о высокой степени полимеризации смолы в композиции. Температура теплостойкости образцов также изменялась незначительно (от 142 до 144°C), что говорит о способности материала сохранять свои механические свойства с ростом температуры вне зависимости от исполнительной толщины материала (табл. 2). Это можно объяснить тем, что данная характеристика в основном определяется свойствами связующего. Как видим, по своим прочностным показателям изучаемый стеклопластик оказывается вполне конкурентоспособным с металлами. Ещё большие преимущества проявляются у стеклопластика в отношении удельных (отнесенных к плотности материала) характеристик (табл. 3).

Таблица 3 – Сопоставление физико-механических показателей исследуемого стеклопластика и металлов

Свойство	Материал	Стекло-пластик (толщина 5,1 мм)	Алюминий	Сталь
Плотность, кг/м ³		1529	2750	7850
Пределы прочности, МПа:				
- при растяжении		136	110 – 185	380 – 470
- при изгибе		166	135	390
- при сжатии		243	62	360
Модули упругости, ГПа:				
- при растяжении		11,0	7,0	20,5
- при изгибе		8,2	7,0	19,0–20,5
- при сжатии		5,6	-	-
Ударная вязкость, кДж/м ²		155	133,5	240,3
Удельная прочность, кПа:				
- при растяжении		89,0	40,0 – 67,3	48,4–59,9
- при изгибе		108,6		
- при сжатии		159	22,5	45,9

Результаты настоящего исследования были использованы при проведении реконструкции элементов оборудования действующего сернокислотного производства. Реконструкция заключалась в замене существовавших газоходов между промывными башнями, изготовленных из традиционных материалов (стальной трубопровод диаметром 900 мм, футерованный изнутри кислотоупорным кирпичом толщиной 130 мм, рис. 3), на

стеклопластиковые газоходы наружным диаметром 600 мм (рис. 4). Данное оборудование подвергается комплексному воздействию химически активных веществ (серная кислота, водяные пары, сернистый ангидрид и др.), находящихся при температурах до 100°C, а также абразивному воздействию на внутренние поверхности оборудования твердых частиц. Рис. 3 – Схема существовавшего футерованного газохода производства серной кислоты (наружный диаметр 900 мм) Вновь спроектированные газоходы были выполнены в виде двухслойной конструкции (рис. 4), в которой внутренний защитный слой был изготовлен из химстойкого стеклопластика (связующее – смола Norpol Dion – 9100), а силовой несущий слой – из стеклопластика на основе смолы Norpol 420 – М 750. Суммарные ежегодные затраты на ремонт существовавшего газохода составляли 867,7 тысяч рублей. Замена газохода на новый позволила резко увеличить срок службы газохода (ориентировочно до 20) лет с обеспечением улучшенной ремонтпригодности конструкции. Стоимость нового газохода составила примерно 2500 тыс. рублей, включая в себя затраты на подготовку производства, осуществляемые однократно, и собственно затраты на изготовление газохода в сумме 600 тыс. рублей. Как видим, стоимость нового газохода (без учета затрат на организацию производства) даже меньше, чем затраты на ремонт существовавшего газохода. В целом суммарные затраты на разработку и внедрение стеклопластикового газохода были окуплены в течение первых 3 лет его эксплуатации. Рис. 4 – Схема реконструированного двухслойного стеклопластикового газохода (наружный диаметр 634 мм) Следует также отметить, что эксплуатация нового газохода не предполагает проведения ремонтных работ (за исключением планового мониторинга технического состояния) в течение всего срока его эксплуатации, который, по нашим данным, оценивается в 20 лет. Это обстоятельство существенно снижает риски, связанные с эксплуатацией газохода и, особенно, – с проведением ремонтных работ. Учитывая положительные результаты промышленной эксплуатации реконструированного оборудования из исследованных композиционных материалов, в период с 2006 по 2010 гг. на этом же производстве были произведены последующие замены других элементов оборудования на химстойкие стеклопластиковые конструкции, включающие: газоходы от промывных башен к электрофильтрам, напорные коллектора холодильников, кислотные корпуса промывных башен, разбрызгивающие устройства, вентиляционные шахты и др. Опыт эксплуатации за последние годы подтвердил эффективность принятых решений.