

## **Многослойные композиты с высокими удельными упруго-прочностными характеристиками на основе полых стеклянных микросфер**

*А.Н. Трофимов (Генеральный директор ОАО «НПО Стеклопластик»)  
Л.В. Плешков (заведующий лабораторией ОАО «НПО Стеклопластик»)*

В настоящее время многослойные композиты с легкими промежуточными слоями (заполнителями) можно условно разделить на два больших класса. Во-первых, это композиты с сотовыми заполнителями и, во-вторых, сэндвич-конструкции, в которых в качестве легкого промежуточного слоя используют различные пенопласты. Каждый из этих материалов имеет свои преимущества и недостатки, что позволяет в каждом конкретном случае определять наиболее эффективную область их применения.

Пенопласты и соты позволяют создавать композиты с высокими удельными прочностными и, особенно, жесткостными характеристиками. Однако низкая сдвиговая прочность и жесткость традиционных заполнителей не позволяют в полной мере использовать весь прочностной потенциал облицовок и, как следствие, все возможности современных сэндвич-композитов. Особенно ярко этот недостаток проявляется при изготовлении сэндвич-конструкций малой толщины. В этом случае для обеспечения высокой прочности и жесткости тонких сэндвич-композитов необходимо использовать облицовки из материала с высокими упруго-прочностными характеристиками. При этом толщина заполнителя становится сопоставимой с толщиной высокопрочных облицовок, в результате чего резко увеличиваются требования к сдвиговым свойствам материала заполнителя. Именно по этой причине сэндвичи на основе сот и пенопластов до сих пор не нашли широкого применения при изготовлении относительно тонких и одновременно высокопрочных конструкций.

Разрушение сэндвич-композита при его изгибе может произойти по двум основным причинам. Во-первых, разрушение облицовок при достижении предела прочности их материала, и, во-вторых, разрушение заполнителя при достижении в нем предельных сдвиговых напряжений. Очевидно, что в идеальном варианте, при оптимизации структуры сэндвич-композита, разрушение облицовок и заполнителя должно происходить одновременно. Однако обычно это не так. Очень часто разрушение многослойной конструкции происходит при нагрузках, при которых один из слоев далеко не исчерпал своих прочностных возможностей.

Основная масса современных сэндвич-композитов изготавливается с тонкими облицовками, изготовленными из материалов с относительно невысокими упруго-прочностными характеристиками, поскольку, как уже говорилось, низкие сдвиговые свойства традиционных заполнителей (соты и пенопласты) часто не позволяют реализовать весь потенциал высокопрочных облицовок. Говоря другими словами, при достижении в заполнителе предельных для данного материала сдвиговых напряжений увеличение прочности и жесткости облицовок не приведет к увеличению прочности всей сэндвич-структуры.

Таким образом, становится ясно, что для совместной работы всех слоев многослойного композита необходимо обеспечить определенный минимум сдвиговых характеристик заполнителя. Очевидно также, что требования к сдвиговым свойствам заполнителя тем выше, чем выше прочность и жесткость

материала обшивок и чем больше их толщина. В настоящее время разработаны математические модели, описывающие поведение многослойных композитных конструкций при их нагружении. Это позволяет сформулировать требования к упруго- прочностным характеристикам материала слоев многослойной композитной конструкции в зависимости от ее геометрии и условий ее нагружения.

В таблице 1 приведены сравнительные свойства пенопластов и композитов на основе полых стеклянных микросфер (синтактиков). Огромное превосходство упруго-прочностных свойств синтактиков перед традиционными видами заполнителей вполне очевидно. Еще одним важным преимуществом композитов на основе полых стеклянных микросфер (ПСМ) является их существенно более высокая тепло- и термостойкость по сравнению с пенопластами. Все это открывает перед материаловедами принципиально новые возможности при создании сэндвич-композитов.

Таблица 1

<b>Характеристики</b>	<b>Пенопласты</b>	<b>Синтактик</b>
Плотность ( $\gamma$ ), Кг \ м <sup>3</sup>	30 -- 400	400 – 650
Прочность при сжатии ( $\sigma$ ), МПа	0,2 -- 12	25 – 95
Удельная прочность при сжатии ( $\sigma / \gamma$ ), 10 <sup>3</sup> м	0,8 – 3,0	6,2 – 15
Модуль упругости при сжатии (E), МПа	20 --600	1000 – 3000
Удельный модуль упругости при сжатии (E / $\gamma$ ), 10 <sup>4</sup> м	0,7– 15	25 – 46
Прочность при сдвиге ( $\tau$ ), МПа	0,3 – 6,5	6 – 22
Удельная прочность при сдвиге ( $\tau / \gamma$ ), 10 <sup>3</sup> м	1,0 – 1,6	1,5 – 3,3
Модуль упругости при сдвиге (G), МПа	11 – 200	500 – 1300
Удельный модуль упругости при сдвиге (G / $\gamma$ ), 10 <sup>4</sup> м	3,7 – 5	12 - 20

Проиллюстрируем это следующим примером. Были изготовлены 2 варианта образцов, представляющих собой трехслойные композитные пластины с легким средним слоем. Размеры образцов, а также толщина заполнителя (5 мм) были одинаковы. Материал облицовок и их толщины (1 мм) также были одинаковы. Различие состояло только в том, что в одном варианте заполнитель представлял собой полиуретановый пенопласт, а в другом - композит на основе

полых стеклянных микросфер (синтактик). В таблице 2 приведены свойства используемых для изготовления этих образцов материалов облицовок и наполнителей.

Таблица 2

Показатели	Заполнитель		Облицовки
	Пенопласт	Синтактик	
Плотность, кг \ м <sup>3</sup>	300	510	2100
Прочность при сжатии, МПа	4,9	62	700
Прочность при сдвиге, МПа	2,9	21	55,0

На фотографиях (Рис.1) отчетливо видно, что в первом случае (а) образец с полиуретановым наполнителем разрушился в результате достижения предела сдвиговой прочности в материале наполнителя (2,9 МПа). Облицовки при этом остались неповрежденными, поскольку напряжения в них составили только 101 МПа. Во втором варианте (б) произошло одновременное разрушение и наполнителя и облицовок, т.е. прочностной потенциал последних (700 МПа) был реализован полностью, а сдвиговые напряжения в синтактике также достигли предельных величин (~ 20 МПа). Следствием этого явилось радикальное увеличение удельной прочности при изгибе сэндвич-композита с наполнителем на основе полых стеклянных микросфер (Рис.2). Эти экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами данных многослойных структур (Рис.3).

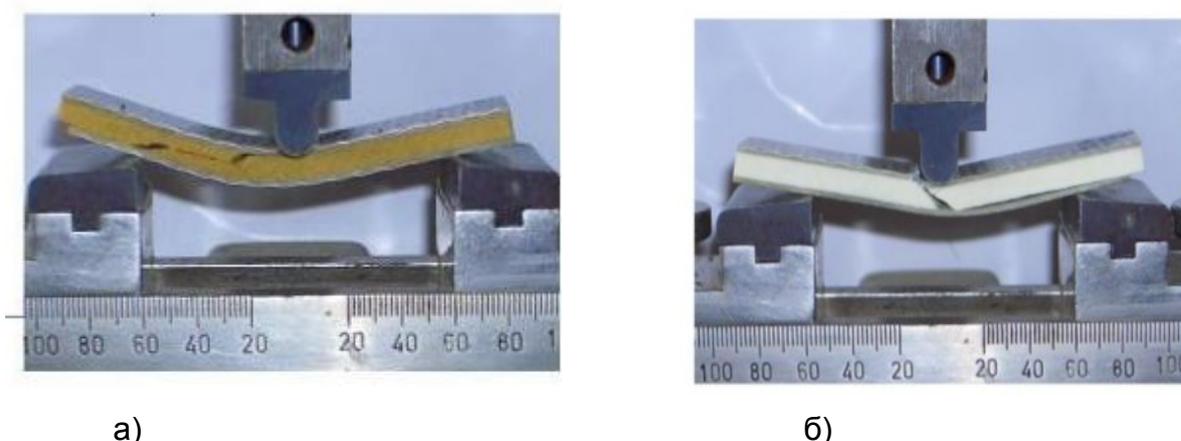


Рис.1. Механизм разрушения сэндвич-композитов с наполнителем из полиуретанового пенопласта (а) и синтактика (б).

Таким образом, даже не смотря на более высокую плотность синтактиков, их использование позволяет резко повысить не только удельную прочность, но также и жесткость сэндвич-конструкций, а при изготовлении тонкостенных сэндвич изделий с высокопрочными облицовками композитам на основе ПСМ просто нет альтернативы.

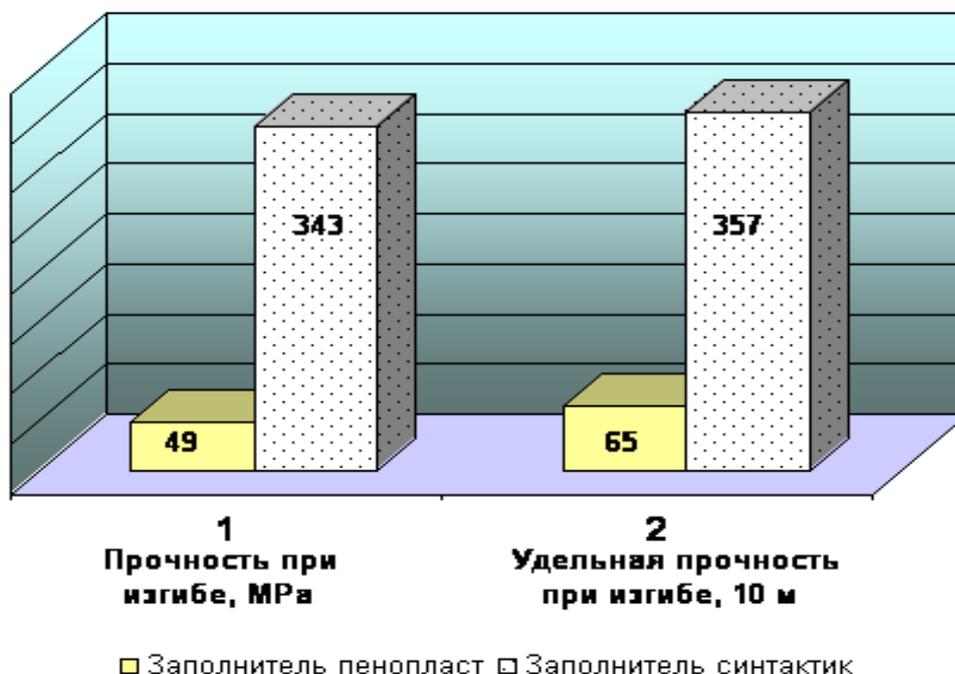


Рис. 2. Сравнительная изгибная прочность сэндвич-композиов с различными заполнителями.

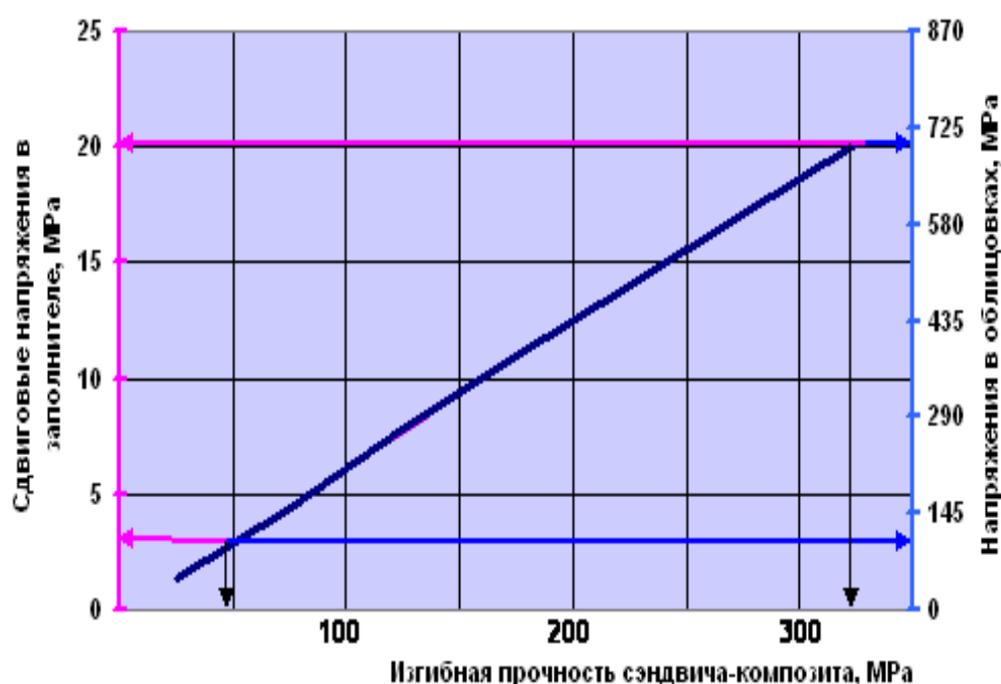


Рис. 3. Зависимость изгибной прочности сэндвич-композита от величины напряжений в облицовках и заполнителе.

Высокие механические свойства синтактиков далеко не единственное их достоинство как материала, используемого в качестве заполнителя при изготовлении сэндвич конструкций. Низкая стойкость к локальным статическим и ударным нагрузкам для многослойных композитов на основе сотовых и пенопластовых заполнителей всегда была большой проблемой. Падение даже не очень тяжелого предмета на такую конструкцию нередко приводит к разрушению облицовок сэндвича. Использование синтактиков на основе ПСМ в качестве заполнителя решает не только эту проблему, но и существенно повышает циклическую и длительную прочность многослойных конструкций. Кроме этого, высокая прочность на смятие позволяет использовать не только болтовое, но и заклепочное соединение таких материалов. Еще одним существенным преимуществом сэндвич композитов с заполнителем из синтактиков является их низкое водопоглощение, а также высокая тепловая и химическая стойкость.

#### Технологические аспекты

Создание сэндвич конструкций всегда представляло собой непростую технологическую задачу, особенно при изготовлении многослойных изделий сложных геометрических форм, переменной толщины и с локальными усилениями. Композиты на основе полых стеклянных микросфер открыли новые возможности для конструкторов и технологов, занимающихся разработкой сэндвич конструкций. Прорыв в этой области стал возможен благодаря созданию высокотехнологичных листовых полуфабрикатов на основе полых стеклянных микросфер. Один из таких материалов, разработанный в НПО «Стеклопластик», получил название СИНЛЭЙ (SYNLAY).

По своей сути СИНЛЭЙ представляет собой аналог листовых прессматериалов типа SMC (препрегов. Внешне СИНЛЭЙ выглядит как раскатанное тесто. В зависимости от требований содержание микросфер в материале может достигать теоретически возможного предела – 70 % объемных. При этом благодаря специально разработанной рецептуре полимерного связующего, материал остается эластичным даже при таком высоком наполнении. СИНЛЭЙ может производиться толщиной от 0,7 до 50 мм. При использовании эпоксидных смол срок хранения материала может составлять 3 месяца при температуре +20° С и до двух лет при температуре – 5 °С.



Главным технологическим преимуществом материала СИНЛЭЙ является его высокая эластичность, что позволяет формировать на его основе изделия самой сложной геометрии (рис.4) с использованием многих известных технологических приемов (прессование, вакуумное и автоклавное формование, накатка, раздув и т.д.). Благодаря хорошей текучести материала изготовление сэндвич

конструкций переменной толщины также не вызывает больших технологических проблем.

Рис. 4. Многослойные трубы с промежуточным слоем из синтактика.

Листовой полуфабрикат на основе HGM позволяет создавать очень тонкие (до 1мм) сэндвич композиты, а также многослойные конструкции сложной структуры, имеющие несколько силовых слоев. В таких изделиях каждый слой имеет свою толщину и заранее рассчитанную схему армирования. Совместная работа слоев рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить наивысшую весовую эффективность конструкции, работающей в условиях сложного нагружения (рис.5).

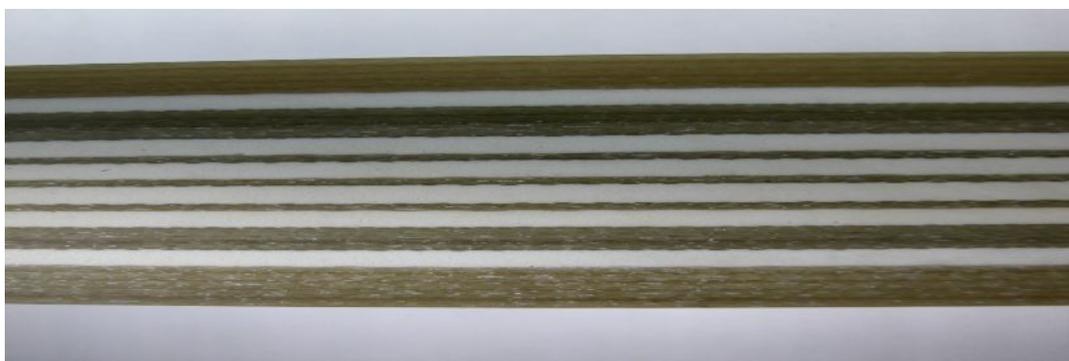


Рис. 5. Поперечный срез многослойного композита с несколькими силовыми слоями

Очевидно, что проектирование подобных изделий требует серьезных математических расчетов. При этом, как правило, механические характеристики традиционных наполнителей (соты и пенопласты) не отвечают предъявляемым требованиям. Более того, на их основе часто технологически невозможно изготовление композитных конструкций столь сложных структур.

Еще одним важным преимуществом материала СИНЛЭЙ является то, что при его использовании в качестве наполнителя не требуются клеи, поскольку полимерного связующего в материале вполне достаточно для его надежного соединения с облицовками, формируемых из препрегов. Таким образом, технология изготовления многослойных конструкций с использованием СИНЛЭЙ практически идентична хорошо освоенной технологии формования изделий из препрегов.

Ясно, что весь огромный потенциал полых стеклянных микросфер раскрыт на сегодняшний день далеко не полностью и в ближайшем будущем будут открыты новые, возможно самые неожиданные области применения ПСМ в индустрии композитных материалов. Однако уже сегодня можно с уверенностью констатировать, что полые стеклянные микросферы уже нашли свою область применения при создании композитных материалов. Это,

прежде всего изготовление легких, высокопрочных, тонкостенных, многослойных изделий сложной геометрии. Очевидно, что при создании подобных конструкций, полым стеклянным микросферам нет равноценной альтернативы. Естественно, что традиционные виды заполнителей будут по-прежнему широко применяться при изготовлении композитных сэндвич конструкций, поскольку во многих случаях их замена на синтактики нецелесообразна ни функционально, ни экономически.