

УДК 691; 669.37;

История развития конструкционных материалов

Вишнякова Е.В. evishnyakova@corp.ifmo.ru

ОАО «Светлана»

194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

В современном строительстве, машиностроении, криогенной технике используется огромное количество конструкционных материалов. Развитие этих отраслей промышленности требует постоянного совершенствования используемых материалов. В данной статье приведен обзор развития конструкционных материалов на протяжении нескольких веков, показано как развитие промышленности влияет на развитие материаловедения. Особое внимание уделяется материалам, работающим при низких температурах, с агрессивными средами, с сжиженными газами, применяемых в авиационно-космической промышленности. Рассмотрим их свойства, и сравним некоторые материалы между собой. Так же, помимо общераспространенных и широко используемых материалов, в статье рассказано о наиболее современных из них, разработанных в нашей стране и получивших широкое распространение и признание во всем мире, благодаря их уникальным свойствам.

Ключевые слова: конструкционные материалы, машиностроение, криогенные температуры, сталь, хладостойкие материалы, сплав алюминия.

doi: 10.17586/2310-1148-2016-9-49-60

The history of the development of construction materials

Vishnyakova E.V. evishnyakova@corp.ifmo.ru

Svetlana OJSC

194156, Russia, St. Petersburg, Engelsa Ave., 27

Here is a huge amount of construction materials in modern construction, mechanical engineering, cryogenics technique. The development of these industries requires a constant improvement of the materials used. This article provides an overview of the development of construction materials for several centuries, shows how industrial development influences the development of materials science. Special attention is paid to the materials that work at low temperatures, aggressive environments, with liquid gases, which used in the aerospace industry. Consider their properties and compare some of the materials to each other. Also, besides of common and widely used material in the article refers to the most modern of them developed in our country and have been widely used and recognized throughout the world, thanks to their unique properties.

Keywords: construction materials, mechanical, cryogenic temperatures, steel, cold-resistant materials, aluminum alloy

В современном машиностроении используется огромное количество конструкционных материалов. И с каждым годом появляется все большее и большее их количество. Но с чего же все начиналось? Какими были конструкционные материалы 300, 100 или 50 лет назад? Данная статья с целью показать историю развития материаловедения и конструкционных материалов, а так же сравнить одни из первых конструкционных материалов с наиболее современными из них.

Конструкционные материалы – основные виды материалов, из которых изготавливаются машины, оборудование, приборы, сооружаются каркасы зданий, мосты и другие конструкции и которые несут основную силовую нагрузку при их эксплуатации.

Конструкционные материалы классифицируются по широкому кругу признаков:

- по применимости: в машиностроении, в строительстве;
- по природе образования: металлические, неметаллические композиционные;
- по реакции на внешние воздействия: горючие, коррозионноустойчивые, жаростойкие, хладостойкие;

– по свойствам, проявляемым при различных методах обработки: пластичные, тугоплавкие, свариваемые, склонные к образованию / трещин, закаливаемые и т. д. ;

– по способам получения: сплавы, прессованные, катаные, тканые, формованные, пленки [1].

История развития технологии конструкционных материалов тесно связана с историей общества. Первыми конструкционными материалами, которые в первозданном виде использовал человек, были камень и древесина. Возникновение технологии обработки природного камня стало первой технической революцией. Общественное разделение труда способствовало разработке основ технологии производства строительных изделий из древесины и керамики. Технологию керамики и технологию литья меди отнесем к следующей крупнейшей технической революции (рис. 1).



Рис. 1. Литье меди

III тыс. до н.э. ознаменуется открытием оловянной бронзы. Именно в ранний бронзовый век было освоено литье металлов с различными модифицирующими добавками. Однако истощение запасов меди в X–XI вв. дало толчок к поиску и развитию новых конструкционных материалов. Именно в это время происходит освоение технологии получения железа. Также совершенствовалась технология обработки железных руд. Использование древесного угля позволило увеличить температуру руды обработки до 900 °С. Загрязненный полуфабрикат очищали прокаливанием и ковкой, получая кузнечное железо.

Новая эпоха в развитии конструкционных материалов началась во 2-м тыс. н.э., что было обусловлено использованием для приводов машин и механизмов энергии падающей воды (рис. 2). Стало возможным расплавлять металл в горнах, перерабатывать его в ковкое железо и очищать от примесей. В XVII в. Появились первые металлургические заводы по производству чугуна.

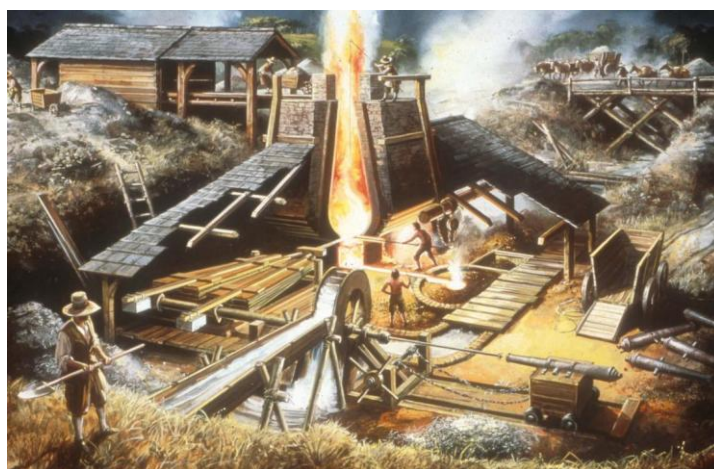


Рис. 2. Мануфактура по производству железа и чугуна

В XVIII веке в качестве топлива для плавки был впервые применен каменный уголь и разработана технология пудлингования – переделка чугуна в малоуглеродистое железо. Разработка

коксования каменного угля дала еще больший толчок для развития металлургии. Во второй половине XIX века был освоен промышленный выпуск стали.

XIX век ознаменован крупными открытиями, которые привели к созданию абсолютно новых технологий и материалов: технологии электросварки и технологии получения полимеров. Начиная с XX века распространение получили новые многокомпонентные материалы – композиты [2].

Композиционный материал (КМ), композит – искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с четкой границей раздела между ними (рис. 3). В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты можно разделить на матрицу (или связующее) и включенные в нее армирующие элементы (или наполнители). КМ создаются под выполнение данных задач, соответственно не могут вмещать в себя все возможные преимущества, но, проектируя новый композит, инженер волен задать ему характеристики значительно превосходящие характеристики традиционных материалов при выполнении данной цели в данном механизме, но уступающие им в каких-либо других аспектах. Это значит, что КМ не может быть лучше традиционного материала во всем, то есть для каждого изделия инженер проводит все необходимые расчеты и только потом выбирает оптимум между материалами для производства. Причем, разные классы композитов могут обладать одним или несколькими преимуществами. Некоторых преимуществ невозможно добиться одновременно [3].

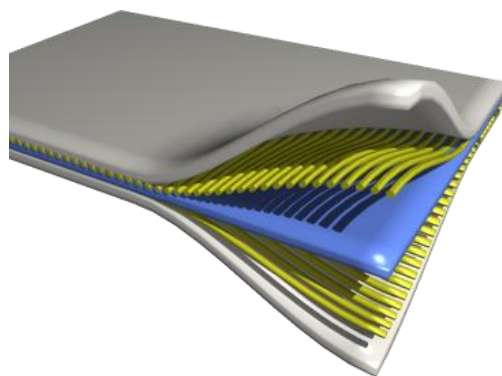


Рис. 3. Схематическое строение композиционных материалов

Виды конструкционных материалов. Конструкционные материалы, используемые в химическом машиностроении, условно делятся на четыре класса:

- стали;
- чугуны;
- цветные металлы и сплавы;
- неметаллические материалы.

Классификация конструкционных материалов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Классификация конструкционных материалов

Степень новизны	Происхождение материалов		
	Металлические	Неметаллические	Композиционные
Традиционные	Чугун, сталь, медь	Стекло, кирпич, древесина, цемент	–
Новые	Специальные сплавы с использованием редких металлов	Пластмассы, полимеры, древесные пластики	Металлокерамика, стеклопластики

С конца XIX в. главным конструкционным материалом становится сталь.

Сталь и чугун являются основными конструкционными материалами во всех отраслях машиностроения. [4]

Сталь – это железоуглеродистый сплав, где содержание углерода не превышает 1,7 %. Для улучшения физико-механических характеристик сталей и придания им особых свойств (жаропрочность, кислотостойкость, и др.) в их состав вводят определенные легирующие добавки.

Наиболее распространенные легирующие добавки:

– хром (Х) – повышает твердость, прочность, химическую и коррозионную стойкость, термостойкость;

– никель (Н) – повышает прочность, пластичность и вязкость;

– вольфрам (В) – повышает твердость стали, обеспечивает ее самозакалывание;

– молибден (М) – повышает твердость, предел текучести при растяжении, вязкость, улучшает свариваемость;

– марганец (Г) – повышает твердость, увеличивает коррозионную стойкость, понижает теплопроводность;

– кремний (С) – повышает твердость, прочность, пределы текучести и упругости, кислотостойкость;

– ванадий (Ф) – повышает твердость, предел текучести при растяжении, вязкость, улучшает свариваемость стали и увеличивает стойкость к водородной коррозии;

– титан (Т) – увеличивает прочность и повышает коррозионную стойкость стали при высоких (>800 °С) температурах.

Чугун – это железоуглеродистый сплав, где содержание углерода превышает 1,7 % (это больше относится к нелегированным чугунам). Серые чугуны представляют собой сплав железа, углерода и других металлургических добавок: кремния, марганца, фосфора и серы. Содержание углерода в чугунах колеблется от 2,8 до 3,7 %, при этом большая его часть находится в свободном состоянии (графит) и только около 0,8–0,9 % находится в связанном состоянии в виде цементита (карбида железа – FeC).

С развитием авиации и электротехники стали широко использоваться такие металлы как алюминий, медь, золото. Все большую ценность приобретают цветные и редкие металлы. Цветные металлы и их сплавы применяют для изготовления машин и аппаратов, работающих со средами средней и повышенной агрессивности и при низких температурах. В химической промышленности в качестве конструкционных материалов используются алюминий, медь, никель, свинец, титан, тантал и их сплавы.

В основе новых конструкционных материалов лежат традиционные. Для криогенной техники важную роль имеет развитие хладостойких материалов.

Основными группами хладостойких материалов являются низкоуглеродистые стали с ОЦК и ГЦК структурой, алюминий и его сплавы (и др.), титан и его сплавы (и др.), некоторые пластмассы (фторопласт-4, полиамиды, пористые полистирол, полиуретан [5])

Хладостойкие стали

Применение находят стали с ОЦК и ГЦК решетками.

Стали с ОЦК решеткой используют главным образом для работы при температурах климатического холода. Температурная граница их применения ограничивается порогом хладноломкости, который в зависимости от металлургического качества стали и ее структуры составляет от 0 до –60 °С. Эффективными мерами снижения порога хладноломкости и повышения надежности работы являются уменьшение содержания углерода, создание мелкозернистой структуры (размер зерен 10–20 мкм), понижение содержания вредных примесей и их нейтрализация добавками редкоземельных металлов, а также ванадия, ниобия, титана, легирование никелем и применение термического улучшения.

Основное применение получили низкоуглеродистые стали, так как с увеличением содержания углерода повышается порог хладноломкости и ухудшается свариваемость стали. Стали обыкновенного качества – спокойные, полуспокойные и кипящие – применяют для разнообразных изделий, включая сосуды, работающие под давлением. Минимальная рабочая температура этих сталей без специальной обработки для низкотемпературной службы ограничивается –20 °С, а у кипящих сталей находится в пределах от 0 до –10 °С, так как у них порог хладноломкости на 10–20 °С выше, чем у таких же спокойных сталей. Комплексом мер, включающих улучшение металлургического качества, измельчение зерна и микролегирование, удается снизить допустимую температуру эксплуатации этих

дешевых сталей до -50 °С. Хотя стоимость стали при этом увеличивается, но она все же ниже стоимости легированных сталей. При использовании сталей при температурах ниже 0 °С необходима обработка конструкции деталей – устранение опасных концентраторов, использование тонкостенных элементов, в которых облегчены температурные деформации. Для крупных конструкций используют свариваемые низколегированные стали повышенной прочности и др. Кроме низкоуглеродистых сталей используют среднеуглеродистые улучшаемые и пружинные стали. Минимальная рабочая температура для них установлена. Стали с никелем имеют лучшую хладостойкость. Никелевые стали содержат не более $0,05$ % С, их применяют в улучшенном состоянии (закалка или нормализация от 830 – 900 °С и отпуск при 600 °С). Стали имеют мелкозернистую структуру, вязки, пластичны, хорошо свариваются. По сравнению с аустенитными сталями они прочнее, лучше проводят теплоту и почти вдвое дешевле. Эти стали используют для крупных конструкций, включая танкеры для перевозки сжиженных газов. Посредственная стойкость против атмосферной коррозии – недостаток никелевых сталей.

Инвар – отличается малым тепловым расширением и стабильной ГЦК структурой. В изделиях из инвара при изменении температуры возникают малые термические напряжения, в конструкциях не требуются компенсаторы деформации. Применение инвара ограничивается недостаточной коррозионной стойкостью и высокой стоимостью. [6]

Хладостойкие сплавы

Алюминий и его сплавы, не имея порога хладноломкости, остаются вязкими при температурах. Прочность при растяжении деформируемых алюминиевых сплавов с понижением температуры от -20 до -192 °С увеличивается на 35 – 60 %, а предел текучести – на 15 – 25 %. Пластичность при снижении температуры обычно даже несколько возрастает или остается на уровне пластичности при комнатной температуре. Вязкость разрушения практически не уменьшается, а это значит, что алюминиевые сплавы при охлаждении менее чувствительны к надрезам, чем при 25 °С. Из-за большого теплового расширения алюминия при жестком закреплении элементов конструкций в них неизбежны значительные термические напряжения. Для их уменьшения применяют компенсаторы деформации или отдельные части конструкции (например, горловины криостатов) изготавливают из материалов с меньшей теплопроводностью, например из аустенитных сталей или пластмасс. При низких температурах (от -253 до -269 °С) чаще всего используют алюминий и термически неупрочняемые свариваемые сплавы. В табл. 2 представлены основные свойства алюминиевых сплавов.

Таблица 2

Основные свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	$T_{исп}$, К	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
Д16	293	470	300	19
	77	560	380	27
	20	660	450	16
Д20	293	400	280	115
	77	510	380	15
	20	660	420	16
1201 (Д20-1)	293	440	350	18
	77	550	400	10
	20	650	450	12
АК6	293	410	300	15
	77	500	380	18
АК8	293	450	310	13
	77	530	410	13
	20	550	360	18
1915	293	340	200	15
	203	370	240	16
	77	470	290	24

Титан и его сплавы не охрупчиваются при температурах от -196 до -268 °С и из-за большой удельной прочности используются в космической технике. Широко применяют технически чистый титан и его однофазные сплавы. Они пластичны, легко свариваются, и после сварки не требуется термическая обработка соединений. В табл. 3 представлены основные свойства титановых сплавов.

Таблица 3

Основные свойства титановых сплавов

$T_{исп}$, К	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	Структура
BT3-1						
293	1080	1010	15	38	70	($\alpha+\beta$)-Сплав
77	1670	1540	6	21	30	
20	1880	1640	4	20	60	
BT5-1						
293	820	800	20	55	100	α -Сплав
77	1320	1310	16	27	40	
20	1580	1400	15	9	40	
OT4-1						
293	650	630	21	54	105	Псевдо- α -сплав
77	1150	1090	25	49	23	
20	1350	–	14	–	30	

Медь и ее сплавы (латуни, бронзы) пластичны, не имеют порога хладноломкости. Кроме того, вязкость разрушения у них повышается при охлаждении. Их применяют для трубных конструкций, крепежных деталей, сварных корпусов, работающих при температурах до -253 °С. В табл. 4 представлены свойства меди и ее сплавов.

Таблица 4

Свойства меди и ее сплавов

Сплав и его состояние	$T_{исп}$, К	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²
Медь М1, отожженная	293	230	50	40	320
	77	350	90	42	420
	20	410	80	64	380
Латунь Л68, отожженная при 550 °С (823 К) в течение 2 ч	293	400	280	50	140
	195	430	310	50	170
	77	540	400	51	140
Латунь ЛЖМц59-1-1, горячекатаное состояние	293	460	200	34	120
	77	600	280	37	100
	20	710	320	38	100
Латунь ЛК80-3, отожженная при 500 °С (773 К) в течение 5 ч	293	390	130	37	100
	77	430	210	23	60
Бронза БрАЖМц10-3-1,5, кованный пруток 12×12 мм после закалки от 850 °С (1123 К) в воде и отпуска при 350 °С (623 К)	293	830	360	18	50
	77	940	430	15	40
Бронза БрБ2 после закалки от 760 °С (1033 К) в воде и старения при 320 °С (593 К)	293	1400	1260	9	20
	77	1600	1470	10	30
	20	1720	1440	9	30

Из-за более высокой стоимости по сравнению с алюминием медь и ее сплавы все больше заменяются сплавами алюминия [7].

Неметаллические хладостойкие материалы

Они имеют более низкую прочность и ударную вязкость по сравнению с металлами. Неметаллические материалы используют для изготовления тепловой изоляции, а также отдельных деталей и элементов конструкций. Для тепловой изоляции используют вспененные полистирол или полиуретан, отличающиеся особенно низкой теплопроводностью. Для деталей и элементов конструкций используют пластмассы, наполненные стеклянным волокном (полиамиды, поликарбонаты). Для подвижных уплотнений применяют фторопласт –4 (до 269 °С), резины (до 70 °С) [8].

Помимо криогенных металлов и сплавов многие другие материалы имеют подходящие характеристики в точно определенной области – при низких (криогенных) температурах. К таким материалам относятся: земля (грунт), бетоны, дерево, пластмассы [8].

Земля

Первый материал, который можно рассматривать как подходящий при строительстве криогенных установок, – это сама земля. В самом деле, замерзание воды, насыщающей грунт, придает ему механическую прочность, позволяющую использовать его в качестве хранилища. Механическая прочность замороженного грунта зависит не только от температуры, но и от насыщенности водой. Необходимо отличать мгновенную прочность от сопротивления ползучести (текучести), которое во много раз меньше по величине. Это различие объясняется наличием льда, который служит цементом между частицами грунта и обуславливает пластичность и ползучесть замороженных грунтов. Некоторые грунты типа глинистых вспучиваются при замерзании за счет впитывания воды, другие, как, например, песчаники, не имеют этой особенности. Значительное вспучивание при замораживании глинистых грунтов, объясняется не замерзанием первичной воды, а поступлением в грунт воды в результате уменьшения парциального давления паров воды на границе промерзания.

Грунт в криогенной технике используется в двух случаях:

1. Подземные резервуары, в которых СПГ хранится прямо в полостях, вырытых в замороженном грунте. Эта техника, представляющая интерес с точки зрения безопасности, была использована в некоторых случаях в шестидесятые годы, но от нее отказались по двум причинам: вокруг хранилищ сжиженного газа происходит подвижка грунта и потери на испарение слишком велики.

2. Противопожарные рвы, окружающие наземные резервуары хранения сжиженного природного газа, – хранилища СПГ.

Бетоны

Бетоны являются криогенными материалами, их механические свойства: сопротивление сжатию, модуль упругости, сопротивление разрыву, коэффициент Пуассона, увеличиваются при низких температурах, в то же время ползучесть уменьшается. С другой стороны, циклы нагрев-охлаждение им противопоказаны: бетон повреждается тем быстрее и больше, чем больше влажность и чем больше термический шок (амплитуда колебаний температуры). Теплопроводность растет в интервале температур от 20 °С до –170 °С на 30–60 % для влажного бетона и на 5–20 % для сухого бетона. С другой стороны, теплоемкость бетона уменьшается с понижением температуры, это понижение возможно составляет около 50 % при –170 °С. Обычно применяют армированные бетоны. Поэтому в каждом случае необходимо учитывать структурное поведение системы бетон-арматура. При охлаждении благодаря разной степени сжатия бетона и стали образуются внутренние напряжения: в первой фазе замораживания влажный бетон расширяется благодаря образованию льда, во второй фазе сокращает свой объем, и при –165 °С существует значительное отклонение в степени деформации бетона и стали. Термические циклы в интервале +20 °С и –165 °С вызывают более или менее значительное повреждение бетона.

В криогенной технике бетон используется по двум направлениям:

1. Как первичный механический барьер для содержания СПГ. От этой технологии постепенно отказываются, так как, поскольку бетон плохо переносит циклы нагрева-охлаждения, эти резервуары могут быть разогреты только в очень редких случаях.

2. Как вторичный барьер, предназначенный для содержания СПГ в случае аварии в первичном барьере. Эта технология в значительной степени увеличивает безопасность наземных резервуаров хранения.

Одно из побочных применений бетона состоит в использовании его в качестве изолирующего материала (например, коллоидный бетон) на поверхности рвов или ловушек, предназначенных для приема СПГ в случае разлива из наземного резервуара. Во всех перечисленных случаях применения чувствительность бетона к термическим циклам не является проблемой, а его прочность к ударам, огнестойкость и прочность при низких температурах делают его идеальным материалом.

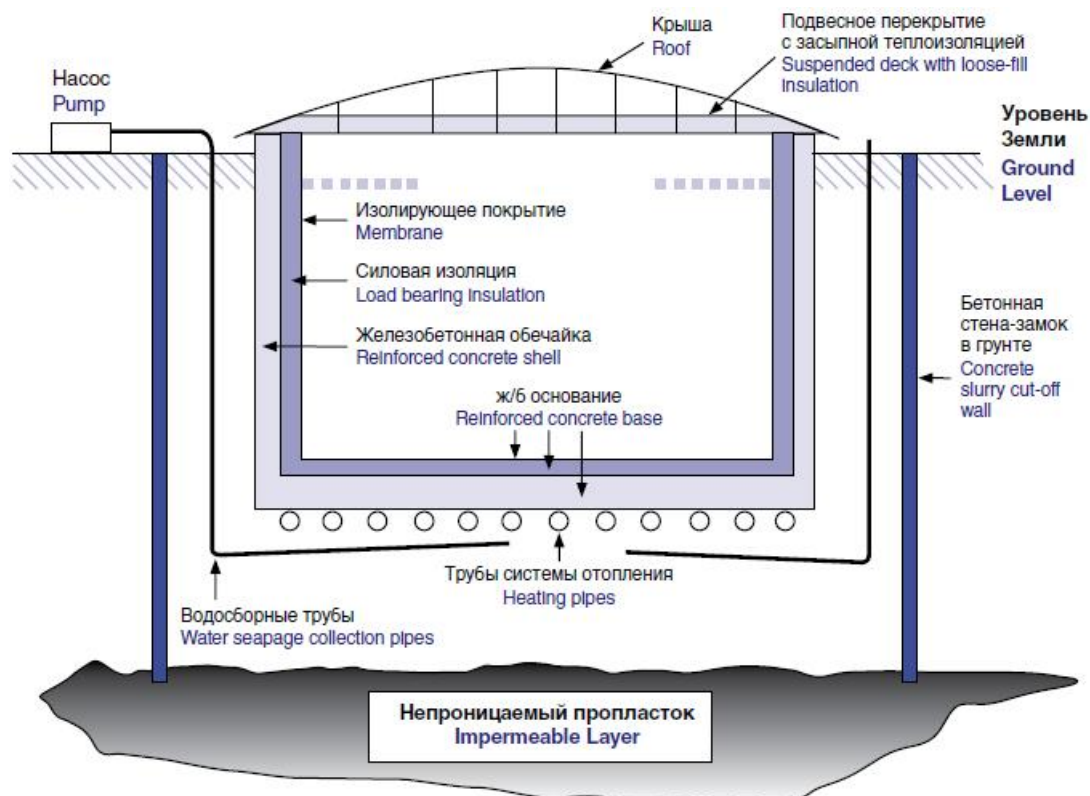


Рис. 4. Схематическое изображение конструкции типового подземного резервуара хранения СПГ

Древесные материалы

Все свойства древесных материалов улучшаются с понижением температуры, и эти материалы не отличаются особой хрупкостью в криогенных условиях. Поэтому деревянные отсеки используются в качестве изоляции, когда хотят одновременно получить достаточную механическую прочность и небольшую теплопроводность. Тем не менее, древесные материалы, используемые в этом качестве, имеют три дефекта в криогенных условиях:

- они растрескиваются;
- их механические характеристики разбросаны;
- их усадка в десять раз больше в поперечном направлении, чем в направлении волокон (размерная нестабильность).

Чтобы избавиться от этих дефектов, часто применяют древесные материалы в виде фанеры, изготовленной в виде листов древесины, склеенных так, что в соседних листах направления волокон ориентированы различно. Свойства клеев, используемых при низких температурах, определяют свойства фанеры, в криогенной технике применяют всегда морские клеи.

Как положительный факт следует отметить, что теплопроводность фанеры сильно уменьшается с понижением температуры и что при $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ее значение примерно вдвое меньше теплопроводности при комнатной температуре. Во всех метановозах, танки которых изготовлены по мембранной технологии, фанера используется как изолирующий материал и механическая опора, а одна из технологий использует фанеру как материал для вторичного барьера [9].

В современном мире широко используются композиционные материалы. Углеродсодержащие материалы и матричные соединения углерода (МСУ) имеют потенциал для использования в климатических и холодильных системах. Последние исследования углеродсодержащих материалов, таких как новый натуральный графит, углеродные пены, углеродные нанотрубки и МСУ, открыли возможности для разработки нового теплообменника - компактного и легкого в применении. Углерод имеет ряд выгодных характеристик, что делает его идеальным строительным материалом для некоторых рабочих сред. Углерод инертен по всей своей структуре, стабилен в широком диапазоне температур (сублимация примерно при 3900 К при атмосферных условиях и точка плавления 4800 К, и устойчив к большинству распространенных агрессивных реагентам. Кроме того, углерод имеет очень низкую плотность по сравнению с металлами и сплавами, что делает его пригодным для компактных и легких систем. Углеродсодержащие композиты с успехом применяются в космической промышленности. С-С панель радиатора на композитной основе с алюминиевым наполнителем ядра ячеек была успешно использована в орбитальном аппарате Земля-1 (ЕО-1) – космический корабль для использования в температурных условиях ~ 300 К.

Равал с соавт. (2006) разработали и изготовили радиатор заполненный теплым газом с YSH50/C-C облицовочным материалом и заполненное с-пенной высокой теплопроводимости (PocoFoam) и встроенным змеевиком из Инконеля для удовлетворения эксплуатационных требований подсистемы управления высот (СКС) (рис. 5). Радиатор был разработан, чтобы удалить максимум возможного тепла от газа, чтобы свести к минимуму выход температуры для входной со значением $500\text{--}750$ °С. Тепло отводилось в окружающее пространство с температурой радиационного поглощения ниже -200 °С. Данные о тепловых характеристиках показывают, что эффективный коэффициент проводимости сборки вокруг Инконелевого трубопровода был около 200 Вт/м²-К; также примем во внимание, что в межтрубном пространстве тепловая проводимость составляла приблизительно 690 Вт/м²-К.

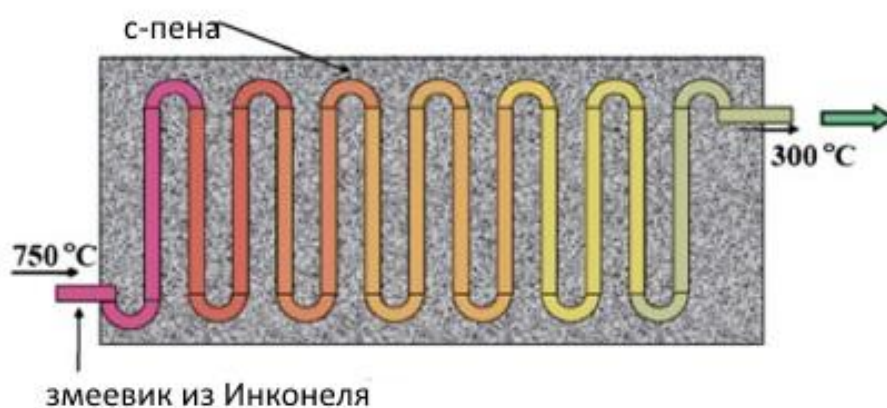


Рис. 5. Конструкция радиатора с использованием С-С панели и С-пена со встроенным змеевиком из Инконеля

Филбурн с соавт. (2006) исследовали эффективность различных ребренных конструкций, применяемых в масляных кулерах, предназначенных для отвода тепла от подшипник вала газотурбинного двигателя с подсосом воздуха. На рис. 6 показан вид одного основного теплообменника. Результаты этого проекта показали, что алюминиевая конструкция имеет общий вес конструкции $11,5$ кг, а углеродный имеет общий вес $5,8$ кг.

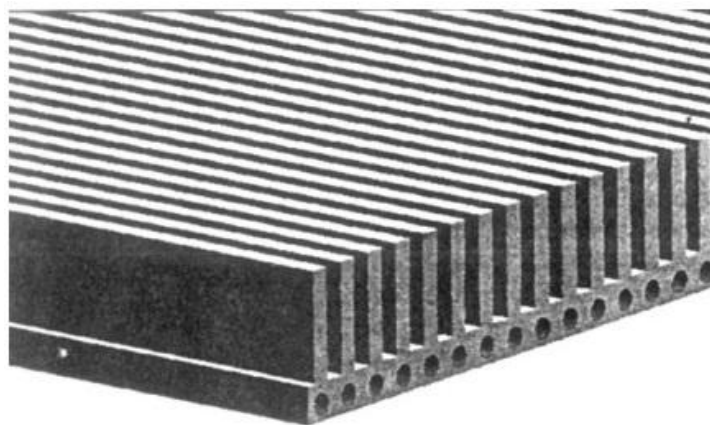


Рис. 6. Вид исследуемого теплообменника

Шук (1991) описал графитовую трубку конденсационного теплообменника для отбора тепла от газового потока загрязненного водяным паром и кислотообразующей составляющей. Трубки изготовлены из кислотостойкого, пропитанного смолой графита с гладкой, моющейся внешней поверхностью. Гильям (1988) сообщил о соединении фторопласта с графитом (Diabon F 100), которое может быть использовано для пластинчатого теплообменника, в качестве замены для металлических материалов, например коррозионностойкой нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов и других. Хотя толщина стенки графитовой пластины (1,5 мм) была больше, чем у металлических пластин, высокая теплопроводность (20 Вт/м·К) обеспечила в целом тепловые коэффициенты передачи, сопоставимые с коэффициентами металла. Этот материал успешно применяется за счет работы с серной кислотой средней силы при 120 °С, концентрированной соляной кислотой выше 100 °С, фосфорной кислотой и 50 % азотной кислотой при температуре кипения. Diabon в настоящее время серийно используется для изготовления пластинчатых теплообменников для работы со множеством агрессивных сред.

Однако, механические свойства углеродсодержащих материалов, таких как низкая удельная прочность и прочность на истирание, затрудняют их обработку и возможность их использования и, следовательно, требуют новых, инновационных методик в проектировании и изготовлении, которые отличаются от тех, что в настоящее время используются при работе с металлами. По-прежнему требуется значительный объем исследований, чтобы полностью охарактеризовать термо-механические свойства материала, поведение этих материалов во время работы и какой-либо эффективный способ сокращения издержек производства [10].

В нашей стране история конструкционных материалов неразрывно связана с Всероссийским научно-исследовательским институтом авиационных материалов (ВИАМ).

С момента основания ВИАМ одной из основных задач института являлось повышение удельных характеристик авиационных материалов.

Первым композиционным материалом, разработанным в 1940 году специалистами ВИАМ была дельта-древесина. Материал, состоящий из слоев шпона карельской березы, пропитанных фенолформальдегидным клеем, по удельной прочности $\sigma/\gamma = 20$ км (усл. ед.) превосходил лучшую сталь предвоенных лет – 30ХГСА (хромансиль). Негорючий и высокопрочный материал стал одним из основных для изготовления истребителей времен ВОВ.

Появление в начале 50-х годов отечественных армирующих наполнителей (рис. 7) на основе стеклянных волокон привело к бурному развитию первых полимерных композиционных материалов (ПКМ) – стеклопластиков.



Рис. 7. Арамидные армирующие наполнители

Рекордные значения удельной прочности были достигнуты на однонаправленных стеклопластиках и составили 95 км (усл. ед.). Эти материалы нашли применение, в первую очередь, для обтекателей радаров, корпусов РДТТ и слабонагруженных авиационных конструкций. В 1971 году в ВИАМ были созданы первые высокомодульные ПКМ: боропластик КМБ-1 с отношением $E/\gamma = 14000$ км (усл. ед.) и углепластик КМУ-1 с $E/\gamma = 9000$ км (усл. ед.). Первые однонаправленные углепластики обладали удельной прочностью 60 км (усл. ед.), которая с появлением новых волокон была увеличена до 150 км (усл. ед.), а модуль упругости – до 12000 км (усл. ед.). В последствии этот класс конструкционных материалов прочно занял свое место в изделиях авиационной техники. В этот же период начаты работы по созданию высокопрочных арамидных органопластиков. Органопластики – рекордсмены среди ПКМ по удельной прочности: на однонаправленных органопластиках σ/γ достигает 180 км (усл. ед.).

Необходимость создания принципиально нового класса материалов с высокими температурами эксплуатации в совокупности с высокими удельными прочностными характеристиками, а также появление армирующих волокон на основе бора с покрытием из карбида бора, устойчивого к окислению углеродного борированного волокна «Кулон», нитевидных кристаллов карбида кремния и других типов тугоплавких наполнителей определило бурное развитие во второй половине 70-х годов металлических и керамических композиционных материалов. В это время были разработаны композиционные материалы на основе алюминиевых, магниевых сплавов, сплавов на основе железа и никеля, тугоплавких керамических и стеклокристаллических соединений с рабочими температурами до 1650 °С. Результатом научно-производственной деятельности коллектива института по направлению «Конструкционные композиционные материалы» является разработка более 300 марок материалов, которые в сотрудничестве с конструкторскими бюро авиационной отрасли, институтами РАН, ЦАГИ, ЦИАМ, НИАТ, ОНПП «Технология» и другими предприятиями внедрены в конструкциях самолетов: Ан-70, Ан-124, Ан-225, МиГ-29; Су-27 и их модификаций, Бе-200, Ил-96-300, Ту-204, Ту-160, Су-26, Су-31М, Су-47, Т-50, SSJ-100 и др.; вертолетов: Ка-26, Ка-50, Ка-52, Ка-60, Ми-26, Ми-28, Ми-38 и др.; газотурбинных двигателей: Д-36, Д-18, ПС-90, ПС-90А2 (Рис.8) и др.



Рис. 8. Авиационный двигатель ПС-90А

Значительную роль материалы ВИАМ сыграли при реализации космических проектов, направленных на создание искусственных спутников Земли «Молния», «Алмаз»; космических станций «Мир» (рис.9), «Альфа», в том числе межпланетных «Венера», «Комета Галлея», «Луна»; ракетносителя «Протон»; многоразового космического корабля «Буран».



Рис. 9. Космическая станция «Мир»

Разработки конструкционных композиционных материалов, проводимые в ВИАМ, опираются на развитие и последние достижения фундаментальной науки в области физики и механики анизотропных сред, физики, химической физики полимеров, термодинамики гетерогенных систем, нанотехнологии, лазерной техники и других. Это открывает широчайшие возможности для дальнейшего совершенствования существующих материалов, расширения их функциональных возможностей и создания принципиально новых композитов и технологий [11].

Список литературы

1. Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., Герасимов С.А. «Справочник по конструкционным материалам», 2005 г.
2. Кононова О.В., Магомедэминов И.И. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие / Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009.–123 с.
3. Интернет материалы Журнал «Механика композиционных материалов и конструкций» [Электронный ресурс] <http://mkmk.ras.ru/> (дата обращения 03.01.2016)
4. Болтон У. «Конструкционные материалы. Карманный справочник», 2004 г.
5. Енике В. Металловедение : справ.: пер. с нем. В 2 т.– М.: Металлургия, 1995.
6. Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др.; Металловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. Под общ.ред. Б.Н. Арзамасова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
7. Интернет материалы ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» [Электронный ресурс] <http://www.crim-prometeu.ru> (дата обращения 18.12.2015)
8. Энциклопедия газовой промышленности. 4-е изд. Пер. с франц.; Ред. пер. К.С. Басниев. М.: Акционерное общество ТВАНТ, 1994. –884 с.
9. Интернет материалы Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева «Основы проектирования производств, использующих мембранное разделение» [Электронный ресурс] http://www.membrane.msk.ru/books/?id_b=9 (дата обращения 12.12. 2015).
10. Q. Wang, X.H. Han, A. Sommers, Y. Park, C.T. Joen, A. Jacobi. «A review on application of carbonaceous materials and carbon matrix composites for heat exchangers and heat sinks». – Elsevier Ltd and IIR, 2011.
11. Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов [Электронный ресурс] http://viam.ru/history_kk (дата обращения 04.12.2015).

Статья поступила в редакцию 04.03.2016 г.