



# Проектирование элементов автомобиля из композиционных материалов

## Лекция 9

### **«Технология изготовления конструкции из металлических и углерод-углеродных композиционных материалов»**

*Составил доцент кафедры «Колесные машины», к.т.н.*

**Карташов Александр Борисович**



# Получение металлических композиционных материалов



Металлические композиционные материалы представляют собой такие материалы, в которых в качестве матрицы выступают металлы и их сплавы, а в качестве арматуры – металлические и неметаллические волокна.

Применение высокопрочных и высокомодульных волокон значительно повышает физико-механические характеристики МКМ, а использование металлической матрицы увеличивает прочность материала в направлении, перпендикулярном волокнам (трансверсальную), и прочность при сдвиге до значений, сопоставимых с аналогичными значениями металлов, так как прочность при сдвиге КМ определяется свойствами матрицы.



# Металлические композиционные материалы



Для металлической матрицы требуется использовать значительно более интенсивные в температурном и силовом отношении технологические методы и, кроме того, производство элементов конструкций из МКМ неразрывно связано с технологией их получения. В настоящее время на базе металлургических производств организован выпуск полуфабрикатов из МКМ в виде листов, труб и профилей.

Технологическую схему производства полуфабрикатов и деталей из МКМ можно представить следующим образом:

- 1) очистка поверхности волокон и матрицы - мойка, чистка, сушка;
- 2) объединение волокон с матрицей - сборка чередующихся слоев матричных элементов и волокон либо приготовление волокон в литейной форме под заливку матричным металлом;
- 3) получение компактных МКМ в соответствии с методами пластической деформации, порошковой металлургии или литья либо с использованием комбинации этих методов.



# Металлические композиционные материалы



Важнейшим в технологии МКМ является этап совмещения армированных волокон с матричным материалом. Способы совмещения можно подразделить на твердофазные процессы, жидкофазные и процессы осаждения — напыления.

Для твердофазных методов характерно использование матрицы в твердом состоянии преимущественно в виде порошка, фольги или тонкого листа.

Процесс создания МКМ заключается в сборке пакета заготовок, состоящего из чередующихся слоев матричного материала и упрочняющих волокон и последующего соединения компонентов между собой различными методами – диффузионной сваркой, сваркой взрывом, пластическим деформированием, спеканием и т.д.



# Металлические композиционные материалы



Жидкофазные методы заключаются в получении МКМ путем совмещения армирующих волокон с расплавленной матрицей. К ним относятся различные методы пропитки волокон жидкими матричными материалами.

Изготовление МКМ методом осаждения — напыления состоит в нанесении на волокна различными способами (газофазным, химическим, электролитическим, плазменным и т.п.) матричного материала и заполнение им межволоконного пространства.

Комбинированные методы основаны на последовательном или параллельном применении первых трех методов (например, плазменное напыление и горячее прессование, горячее прессование и последующая прокатка и т.д.)



# Металлические композиционные материалы



Выбор метода получения МКМ определяется природой матрицы и волокна, возможностью совмещения компонентов с обеспечением необходимой между ними связи на границе раздела, особенностью процесса, позволяющего одновременно получить материал и деталь, экономичностью, наличием оборудования и т.д.

Несмотря на то, что в настоящее время лишь небольшое число МКМ находится в стадии внедрения, а возможности их применения ограничиваются авиационной, ракетно-космической и атомной техникой, несомненно, что в дальнейшем МКМ найдут самое широкое применение и будут способствовать технологическому усовершенствованию свойств обычных материалов.

Рассмотрим основные методы получения МКМ, применяемые на практике.



# Метод твердофазного совмещения матрицы и волокон



Обработка давлением является одним из наиболее часто применяемых методов изготовления МКМ, состоящих из деформируемых матричных металлов и сплавов.

Если в качестве арматуры выбраны волокна со значительным запасом пластичности, то уплотнять МКМ можно прокаткой, импульсным прессованием с помощью взрыва или ударной нагрузки, гидроэкструзией и т.п. В случае армирования металлов хрупкими или малопластичными волокнами чаще всего применяют процессы, при которых степень пластической деформации невысока, например диффузионную сварку или прокатку с малыми обжатиями.

В зависимости от формы полуфабриката используют различные способы сборки заготовок, подвергаемых пластической деформации.



# Метод твердофазного совмещения матрицы и волокон



Листовые заготовки собирают **способом монослоев** или **способом «СЭНДВИЧ»**.

Заготовки типа «сэндвич» – укладкой в пакет слоев волокон (сеток, матов, тканей) и матричных слоев фольги, соблюдая последовательность укладки слоев, требуемую схему армирования и степень армирования.

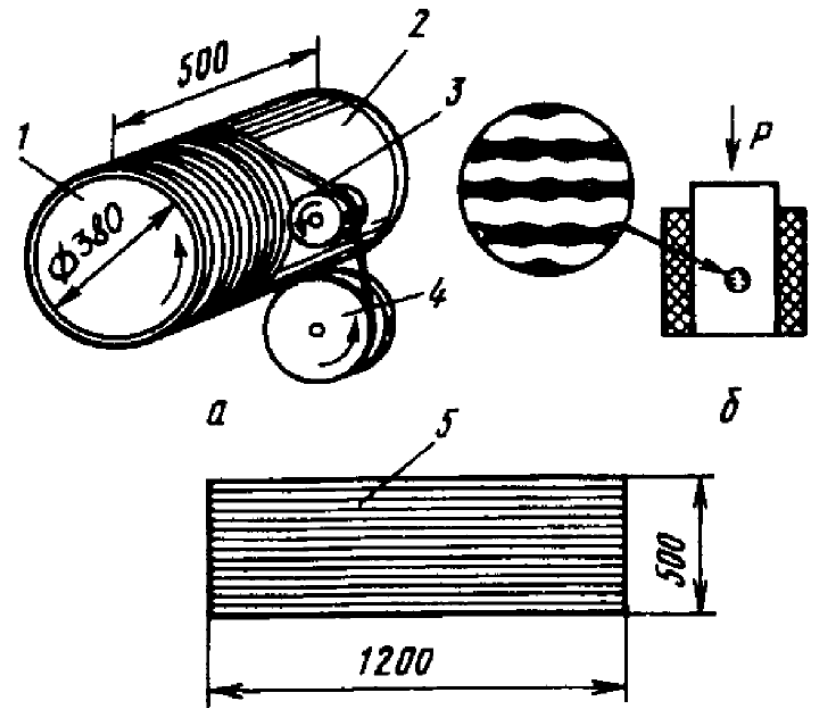
Нужную степень армирования в заготовке обычно обеспечивают за счет применения матричной фольги различной толщины, укладки различного числа слоев арматуры или использования волокон разного диаметра.

Способом «сэндвич» получают заготовки только с продольно-поперечным расположением волокон.

В соответствии со способом монослоев, можно собирать заготовки, в которых слои волокон могут быть ориентированы под разными углами один к другому для наилучшего восприятия внешних нагрузок.

При сборке заготовок этим способом осуществляют намотку бороволокна (одного слоя волокон с требуемым шагом и углом намотки) с бобины на цилиндрический барабан-оправку, на котором закреплен слой алюминиевой фольги.

Для фиксации геометрии укладки волокна закрепляют на фольге беззольным клеем в местах, по которым в дальнейшем фольга разрезается. Снятые с барабана монослои укладывают в нужном порядке в стопку и уплотняют прессованием.



**Рис. 1.21.** Схема формирования боро-алюминиевых МКМ способом намотки монослоев:

*а* – получение заготовки; *б* – прессование заготовки; 1 – барабан; 2 – алюминиевая фольга; 3 – натяжное устройство; 4 – бобина бороволокна; 5 – заготовка

Трубчатые и прутковые заготовки получают прокаткой, экструзией и волочением.

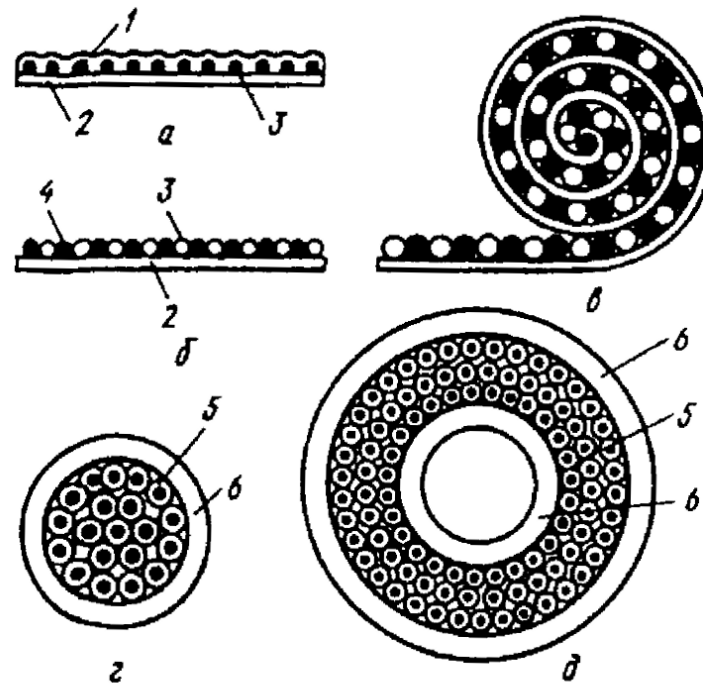


Схема получения армированных рулонных прутковых заготовок (*a* – *в*) и трубчатых заготовок из биметаллической проволоки (*г*, *д*):  
*a* – армированный монослой; *б* – полоса с армирующими и матричными волокнами; *в* – сворачивание армированной полосы в рулон; *1* – матричная рифленая фольга; *2* – матричная полоса; *3* – армирующее волокно; *4* – волокно из металла матрицы; *5* – биметаллическое волокно; *б* – трубчатая оправка

Армированный монослой (рис. **а**), состоящий из матричной рифленой фольги и матричной полосы (рис. **б**), между которыми расположены волокна, сворачивают в плотный рулон (рис. **в**), подлежащий последующему уплотнению.

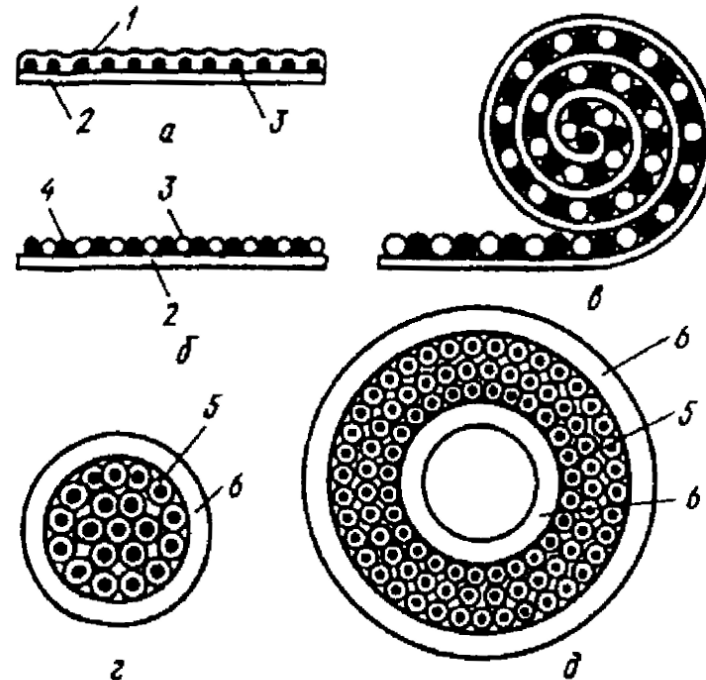


Схема получения армированных рулонных прутковых заготовок (*а – в*) и трубчатых заготовок из биметаллической проволоки (*г, д*):  
*а* – армированный монослой; *б* – полоса с армирующими и матричными волокнами; *в* – сворачивание армированной полосы в рулон; *1* – матричная рифленая фольга; *2* – матричная полоса; *3* – армирующее волокно; *4* – волокно из металла матрицы; *5* – биметаллическое волокно; *6* – трубчатая оправка

Другим методом получения прутковых заготовок, в которых арматура ориентирована вдоль оси прутка (рис. г), можно назвать укладку в трубу волокон с нанесенным на них матричным покрытием (биметаллическое волокно).

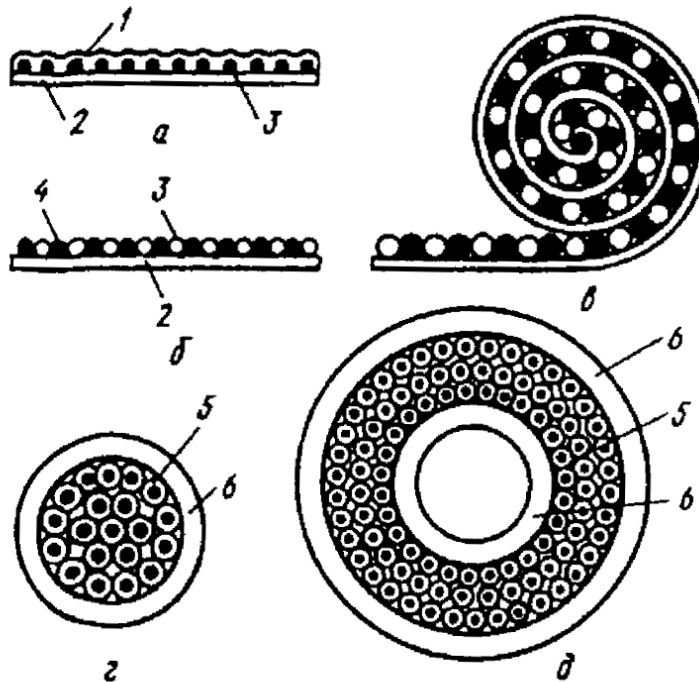


Схема получения армированных рулонных прутковых заготовок (*а* – *в*) и трубчатых заготовок из биметаллической проволоки (*г*, *д*):  
*а* – армированный монослой; *б* – полоса с армирующими и матричными волокнами; *в* – сворачивание армированной полосы в рулон; *г* – матричная рифленая фольга; *д* – матричная полоса; *ж* – армирующее волокно; *з* – волокно из металла матрицы; *и* – биметаллическое волокно; *к* – трубчатая оправка

Если укладку биметаллических волокон провести между внутренней и наружной трубами (рис. д), то можно получить трубчатую заготовку МКМ.

Уплотняют такие заготовки гидроэкструзией или волочением. Трубчатые заготовки можно также получить совместной намоткой армирующего и матричного волокон.

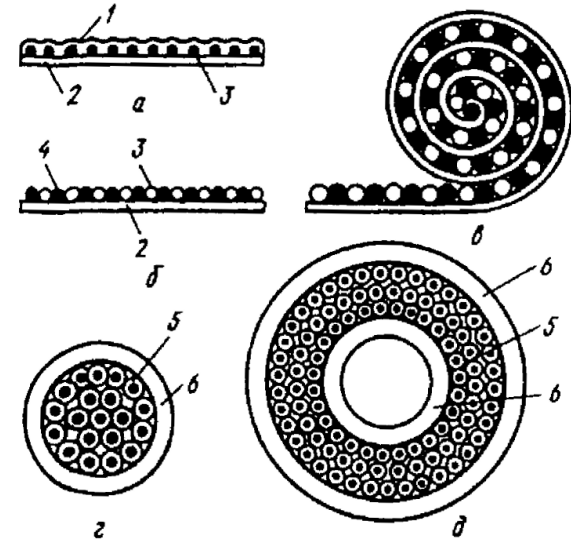


Схема получения армированных рулонных прутковых заготовок (*a* – *в*) и трубчатых заготовок из биметаллической проволоки (*г*, *д*):  
*a* – армированный монослой; *б* – полоса с армирующими и матричными волокнами; *в* – сворачивание армированной полосы в рулон; *1* – матричная рифленая фольга; *2* – матричная полоса; *3* – армирующее волокно; *4* – волокно из металла матрицы; *5* – биметаллическое волокно; *б* – трубчатая оправка

Наиболее производительный способ производства армированных лент и листов - прокатка. Согласно этой технологии между валками прокатного стана уплотняют либо матричные ленты и арматуру в виде непрерывных волокон (сеток, листов), либо ленты с расположенными между ними дискретными элементами.

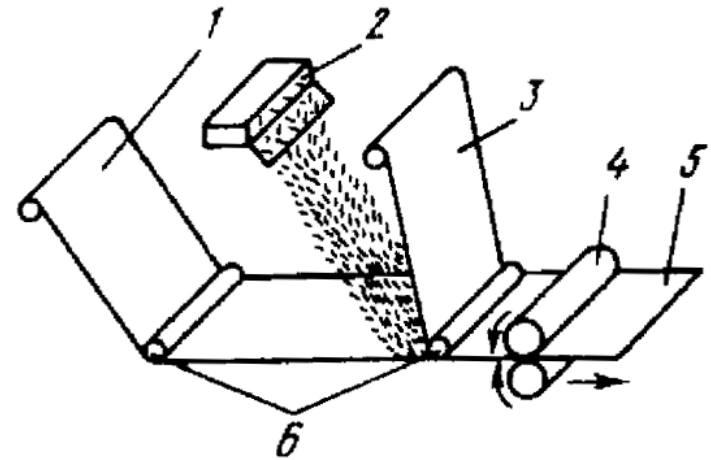


Схема непрерывного процесса прокатки металлических армированных полос:

1, 3 – разматыватели полос; 2 – бункер для дискретных волокон; 4 – рабочая клетка прокатного стана; 5 – армированная полоса; 6 – ролики

Прокаткой можно получить и армированные профили. Для этого используют сортовые прокатные станы, в калибры которых подают матричные ленты вместе с волокнами.



# Метод твердофазного совмещения матрицы и волокон



Для уплотнения заготовок типа «сэндвич», а иногда для изготовления готовых деталей из МКМ применяют диффузионную сварку. Отличительным признаком этого процесса является отсутствие больших пластических деформации, поэтому диффузионная сварка незаменима при получении МКМ, армированных хрупкими волокнами. Особенно большими возможностями обладает метод диффузионной сварки под давлением в газостате или автоклаве.

Динамическое горячее прессование основано на использовании для уплотнения пакета энергии удара. Предварительно пакет равномерно прогревают, затем переносят под молот и наносят удар падающими частями с заданной энергией. При этом компоненты МКМ соединяются в течение долей секунды.

Недостаток этого метода получения МКМ — нельзя использовать хрупкие волокна.



# Метод твердофазного совмещения матрицы И ВОЛОКОН



Сварка взрывом - весьма перспективный метод получения МКМ как в виде полуфабрикатов (листов, труб), так и в виде готовых изделий. При его использовании требуется нагрев перед деформацией, что позволяет сохранить исходную прочность армирующих волокон.

В таблице далее представлены характеристики однонаправленных МКМ, полученных методами твердофазного совмещения.



# Характеристики однонаправленных композиционных материалов с алюминиевой и магниевой матрицей



Характеристика	Сталеалюминиевая проволока		Бороалюминиевое волокно	Боромагниевое волокно
	Содержание волокна, % (об.)			
	25	40	50	45
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	4100	4800	2650	2200
Прочность при растяжении $\sigma_1^+$ , МПа:	1177	1569	1128	1226
при 293 К				
при 673 К	735	784	834	883
Модуль упругости $E_1^+$ , МПа	102 970	117 680	235 360	196 133
Длительная прочность $\sigma_1^+$ , МПа, за 100 ч при 673 К	392	441	637	588
Усталостная прочность $\sigma_1^+$ , МПа	294	343	588	539
КЛТР $\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	—	11,8	6,0	6,5



# Метод жидкофазного совмещения матрицы и волокон



Существует несколько разновидностей метода, различающихся между собой условиями пропитки армирующего наполнителя:

- 1) пропитка расплавом при нормальном давлении;
- 2) вакуумное всасывание;
- 3) пропитка расплавом под давлением;
- 4) комбинированные методы пропитки (с использованием давления и вакуума, центробежных сил и т.д.).

Условия пропитки в основном определяются реакционной способностью расплавленной матрицы и смачиваемостью волокон матрицей. Металлические матрицы, как правило, плохо смачивают керамические армирующие волокна. Увеличить способность металлов смачивать керамику удастся за счет введения в расплав легирующих веществ: титана, хрома, циркония.



# Метод жидкофазного совмещения матрицы и волокон



Пропитка волокон расплавом матрицы при нормальном давлении (его иногда называют методом непрерывного литья КМ) является наилучшим способом изготовления изделия сложной формы и полуфабрикатов в виде прутков, труб, профилей и т.д.

Этот метод применим в тех случаях, когда волокна термодинамически стабильны в расплавленной матрице. Самый простой вариант этого метода заключается в укладке волокон в литейную форму и заливке в нее расплавленного металла матрицы.

Перспективной и значительно более широко применяемой разновидностью метода пропитки расплавом при нормальном давлении является непрерывная пропитка пучка волокон.

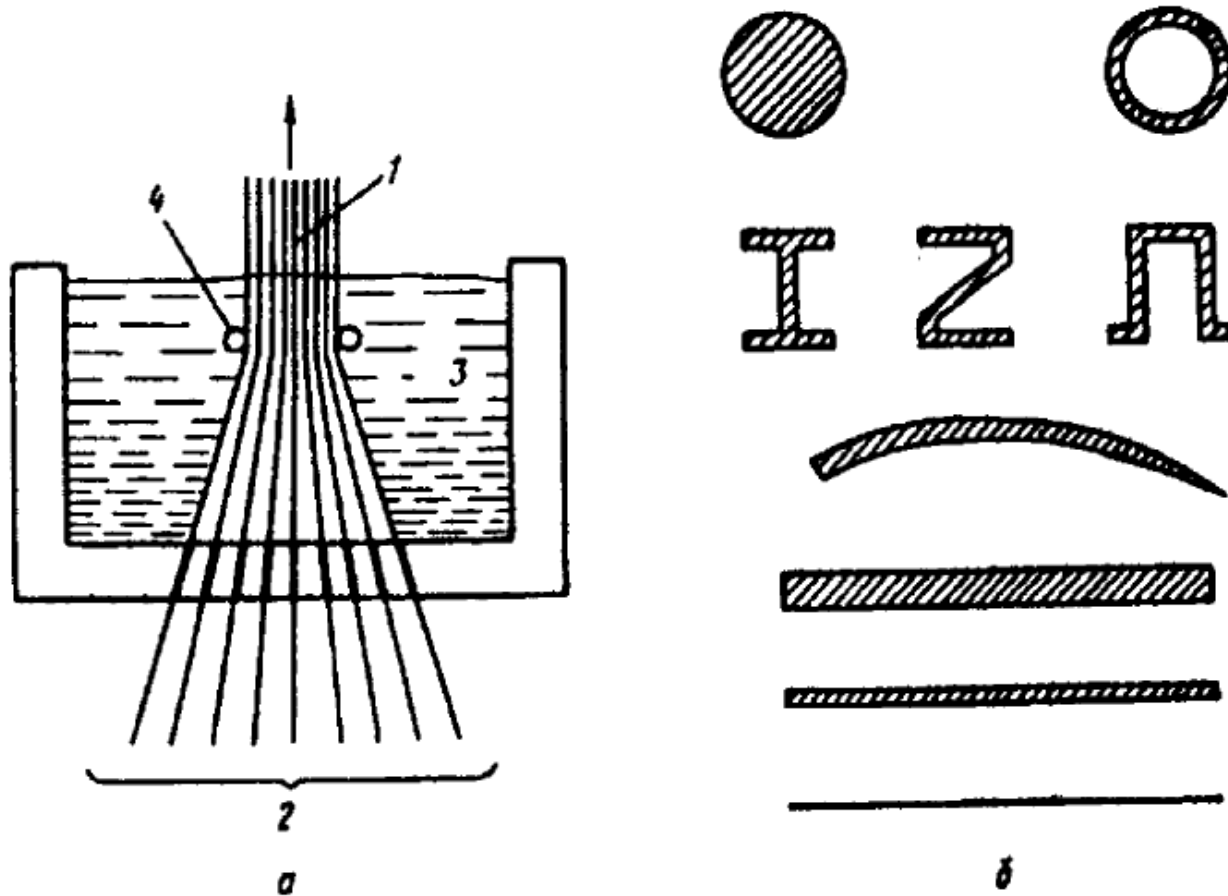


Схема процесса непрерывной пропитки жидким металлом (а) и получаемые виды изделий (б):

1 – композитный пучок; 2 – разделенные волокна; 3 – расплавленный металл; 4 – ограничители пучка волокон



# Характеристики боромагниевых МКМ, полученных методом непрерывной пропитки пучка



## Характеристики боромагниевых МКМ, полученные методом пропитки

Содержание волокна, % (об.)	Прочность $\sigma$ , МПа			Модуль упругости при растяжении $E_1^+$ , ГПа	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
	при растяжении	при изгибе	при сжатии		
25	—	1130	—	105	1960
35	—	—	2090'	—	2000
65	—	—	3190	—	2300
75	1350	1600	—	329-343	2400



# Метод жидкофазного совмещения матрицы и волокон



Для упрочняющих волокон, склонных к окислению при нормальных условиях, необходимо применять защитную атмосферу либо вакуум при переработке их в МКМ.

Методом пропитки в вакууме получают МКМ:

- 1) на основе алюминия и магния, упрочненные борными волокнами,
- 2) на основе никелевых сплавов — упрочненные вольфрамовой проволокой,
- 3) Другие МКМ.

Композиционные материалы в силу метода пропитки в вакууме производят в промышленных вакуумных плавильных печах с нагревательными устройствами различного типа (индукционные, высокочастотные, электроннолучевые и др.), оснащенных устройствами для заливки форм в вакууме. Применяют для этой цели и специально сконструированные установки (см. рисунок далее).

# Метод жидкофазного совмещения матрицы и волокон. Пропитка волокон жидким металлом

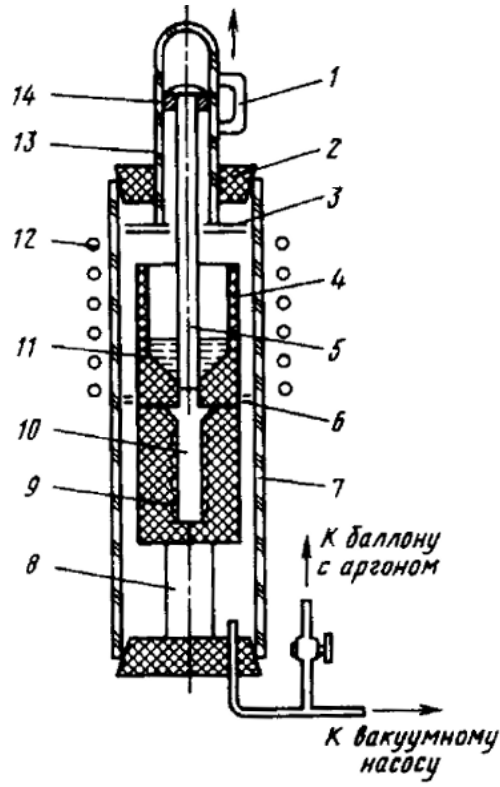


Схема установки для пропитки волокон жидким металлом в вакууме:

- 1 – магнит; 2 – резиновая пробка; 3, 6 – теплового экраны; 4 – графитовый тигель; 5 – графитовый шток; 7 – кварцевая труба; 8 – керамическая опора; 9 – графитовая форма; 10 – волокна; 11 – расплав матрицы; 12 – индуктор; 13 – кварцевый колпак; 14 – стальное кольцо

Установка представляет собой кварцевую трубу, в которой на керамической опоре размещен графитовый цилиндр. Верхняя часть этого цилиндра служит тиглем для приготовления: расплава матрицы, а нижняя часть — формой для укладки упрочняющих волокон.

Нижняя часть тигля сообщается с формой цилиндрическим каналом, расширяющимся вблизи верхней части формы и играющим после заливки роль прибыльной части.

До заливки отверстие в дне тигля закрыто графитовой пробкой, выполненной в виде штока постоянного диаметра с утолщением в верхней части, опирающимся на стальное кольцо, через которое пропущен шток. При помощи этого кольца и постоянного магнита шток может подниматься и открывать отверстие в дне тигля.



# Метод жидкофазного совмещения матрицы и волокон. Пропитка волокон жидким металлом

Верхняя и нижняя части кварцевой трубы заглушены резиновыми пробками. Нагрев тигля и расплавление металла осуществляются индуктором, расположенным поверх кварцевой трубы на уровне графитового тигля. Верхняя и нижняя резиновые пробки изолируются от горячего тигля специальными теплозащитными экранами.

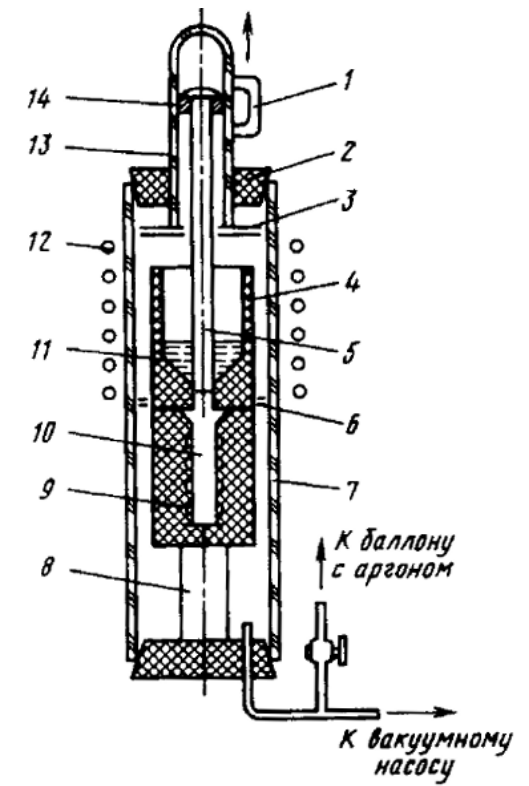


Схема установки для пропитки волокон жидким металлом в вакууме:

- 1 – магнит; 2 – резиновая пробка; 3, 6 – теплозащитные экраны; 4 – графитовый штук; 5 – графитовый тигель; 7 – кварцевая труба; 8 – керамическая опора; 9 – графитовая форма; 10 – волокна; 11 – расплав матрицы; 12 – индуктор; 13 – кварцевый колпак; 14 – стальное кольцо

Рассмотрим технологический процесс получения КМ.



# Метод жидкофазного совмещения матрицы и волокон. Пропитка волокон жидким металлом

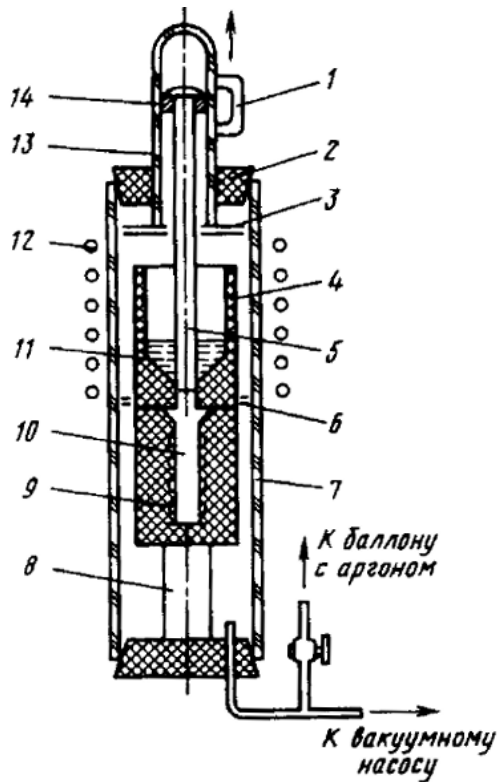


Схема установки для пропитки волокон жидким металлом в вакууме:

1 – магнит; 2 – резиновая пробка; 3, 6 – тепловые экраны; 4 – графитовый тигель; 5 – графитовый штوك; 7 – кварцевая труба; 8 – керамическая опора; 9 – графитовая форма; 10 – волокна; 11 – расплав матрицы; 12 – индуктор; 13 – кварцевый колпак; 14 – стальное кольцо

Форму с уложенным в ней упрочнителем вставляют в нижнюю часть графитового цилиндра. В тигель, отверстие в дне которого закрыто графитовым штком, заливают металл матрицы. Систему вакуумируют, и включают нагревательные элементы. После расплавления матрицы штк поднимается при помощи магнита, и расплавленный металл заполняет форму. Для обеспечения минимального количества воздуха в установке в процессе вакуумирования ее несколько раз промывают аргоном.



# Метод жидкофазного совмещения матрицы и волокон



Методом пропитки в вакууме получают композиты:

- на основе алюминия и магния, упрочненные борными волокнами и нитевидными кристаллами;
- на основе никелевых сплавов, армированные вольфрамовой проволокой и др.

Очевидно, что пропитка жидким алюминием борного волокна без защитного покрытия приводит к его резкому разупрочнению даже при очень незначительном времени контакта волокна с расплавленным металлом. Об этом свидетельствуют низкие значения прочности композита.

Значения предела прочности бороалюминиевого волокна, полученного при различных технологических параметрах методами заливки и пропитки в вакууме приведены в таблице далее



# Характеристики бороалюминиевого композиционного материала, содержащего 60 % (об.) волокна, полученного в вакууме



Метод изготовления	Параметры технологического процесса		Предел прочности $\sigma_1^+$ , МПа	Метод изготовления	Параметры технологического процесса		Предел прочности $\sigma_1^+$ , МПа
	$T$ , °С	$t$ , мин			$T$ , °С	$t$ , мин	
Заливка (волокна бора с покрытием)	670	10	830	Пропитка	701	4,5	520
	720	10	1020				
	765	10	910				
	782	6	750				



# Метод жидкофазного совмещения матрицы и волокон. Углеалюминий

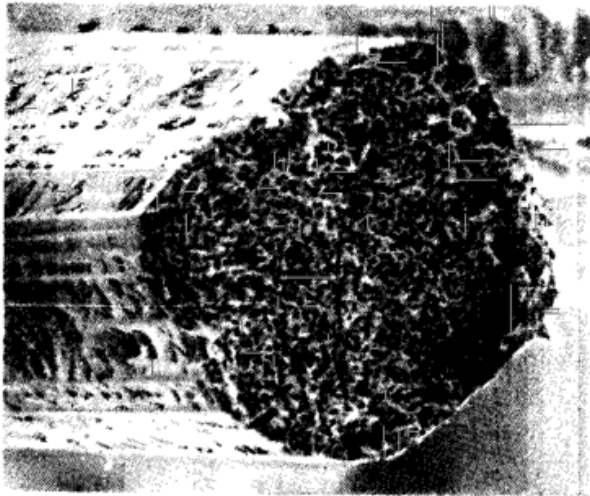


Пропитку используют для получения углеалюминия.

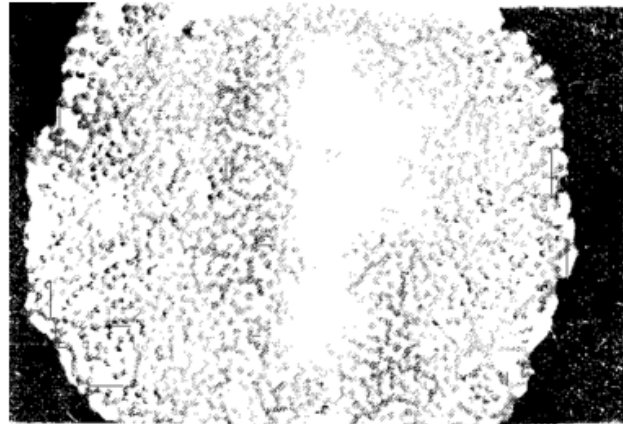
Применяют две разновидности метода пропитки:

- 1) протяжку углеродного жгута через матричный расплав с последующим форованием пропитанных жгутов;
- 2) принудительную пропитку каркаса из углеродных волокон, уложенных в пресс-форму.

Характеристики материалов при этом получают примерно одинаковыми.



*a*



*б*

Микрофотографии полуфабриката алюминия, армированного углеродными волокнами, в виде проволоки, полученной методом пропитки в расплавленном металле. *a* – внешний вид (увеличение  $\times 50$ ); *б* – поперечное сечение (увеличение  $\times 60$ ).



# Газофазные методы осаждения — напыления



Осаждение—напыление — это газофазные, химические и электрохимические процессы получения МКМ. Главной технологической особенностью этих процессов является нанесение на волокна покрытий из матричного материала, который, заполняя межволоконное пространство, образует матрицу МКМ.





# Газофазные методы осаждения — напыления



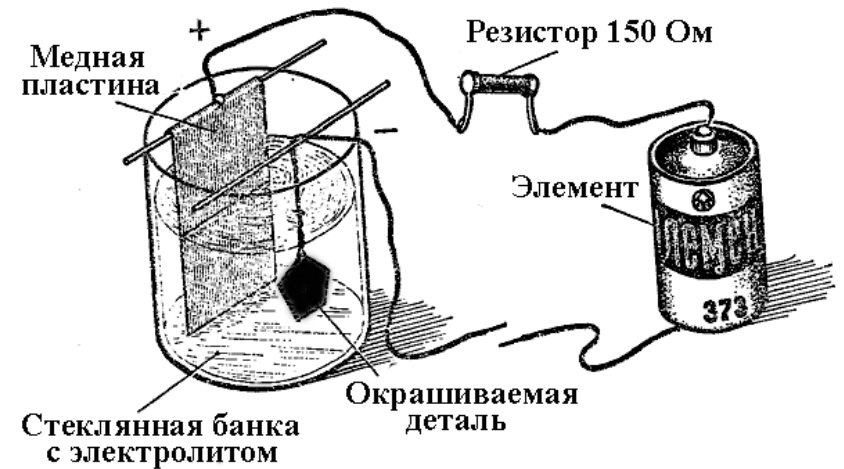
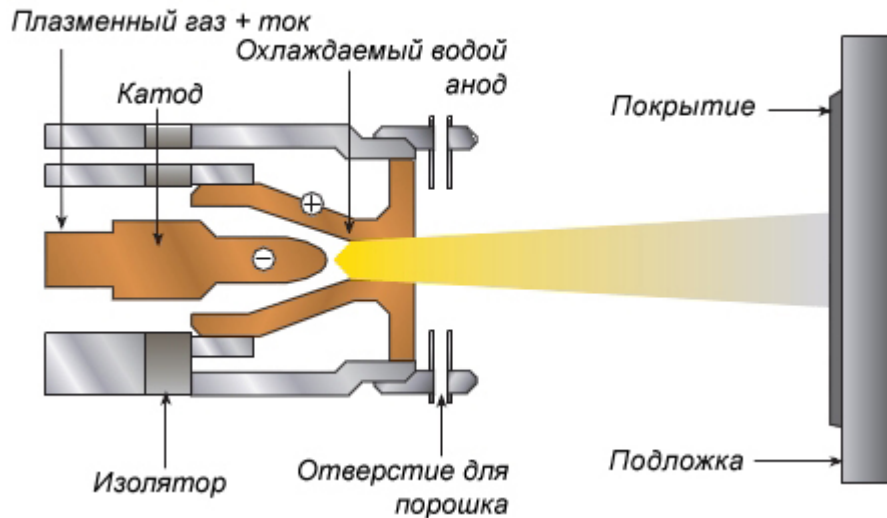
## Преимущества метода осаждения—напыления:

- 1) отсутствует разупрочнение волокон, поскольку волокно в процессе форообразования изделий из МКМ не подвергается воздействию высоких температур или значительным механическим нагрузкам;
- 2) исключается возможность непосредственного нежелательного контакта волокон между собой;
- 3) имеется возможность формообразования полуфабрикатов и изделий сложной геометрической формы;
- 4) процесс введения матрицы может быть непрерывным, в том числе и в промышленных масштабах.

Главным **недостатком** процессов осаждения-напыления является трудность использования в качестве матриц сложнолегированных сплавов.

В практике производства МКМ наибольшее применение получили методы:

- 1) газотермического (обычно, плазменного) напыления;
- 2) электролитического осаждения.





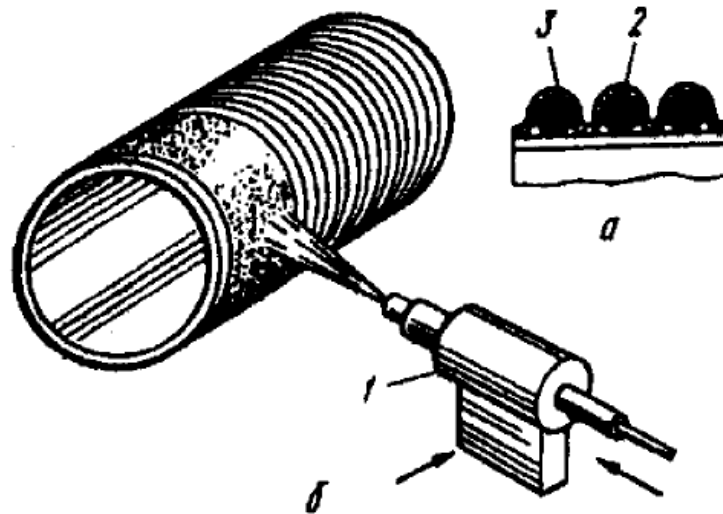
# Плазменное нанесение покрытий



Плазменное нанесение покрытий заключается в следующем: наносимый материал матрицы в виде порошка или проволоки подводится к плазменной струе, температура которой составляет примерно 15000 К, расплавляется и подхваченный сильным потоком плазмообразующего газа (например, аргона) направляется к поверхности изделия. Двигаясь с большой скоростью (150 м/с), частицы материала при ударе о поверхность подложки (металлическая фольга) прочно соединяются с уложенными на ней определенным образом волокнами.

Полученный таким образом МКМ требует дальнейшей обработки давлением или диффузионной сваркой.

Схемы получения МКМ с использованием метода плазменного напыления показаны на рисунке



Схемы плазменного напы-  
ления монослойных заготовок (а) и  
цилиндрической детали (б):

1 – плазматрон; 2 – волокно; 3 –  
напыляемый материал

Принципиальная схема изготовления МКМ электролитическим осаждением с использованием непрерывных волокон показана на рисунке.

Волокно перематывается с катушки на специальную металлическую оправку, служащую катодом. Оправка частично погружена в электролит и совершает вращательное движение с заданной скоростью.

Анод, изготавливаемый из осаждаемого металла — матрицы, размещается на определенном расстоянии.

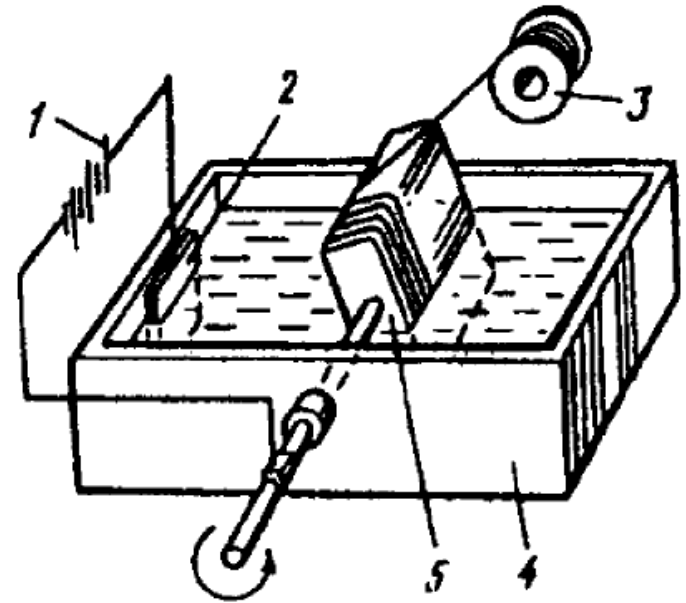


Схема изготовления МКМ способом электролитического осаждения:

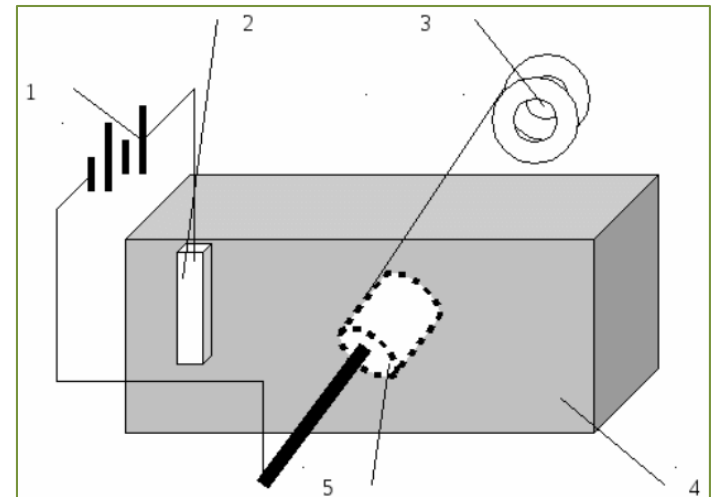
1 — источник питания; 2 — анод; 3 — шпуля с волокном; 4 — ванна с электролитом; 5 — катод-оправка

В результате осаждения материала анода на оправку образуется, как правило, плотный, малопористый материал, который фактически не требует дальнейшего уплотнения методами прессования, спекания, прокатки.

При использовании волокон бора или металлических волокон диаметром 100 мкм и более в процессе формирования МКМ образуется пористость.

Схема изготовления МКМ способом электролитического осаждения .

1- источник питания ; 2- анод ; 3 – шпуля с волокном ; 4 – ванна с электролитом ; 5 – катод – оправка.



В таблице далее представлены свойства никелевых МКМ, полученных способом электролитического осаждения.



# Характеристики никелевых МКМ



Наполнитель	Содержание волокна $v_{в}^{об}$ , %	Прочность при растяжении $\sigma_1^+$ , МПа	Модуль упругости при растяжении $E_1^+$ , ГПа
Вольфрамовое волокно диаметром 50-100 мкм	16	1050	189
	20	1190	175
	30	1160	210
	50	1640	238
Борное волокно диамет- ром 100 мкм	15	800	196
	23	840	210
	35	1120	224
Волокно карбида крем- ния	42	1310	224
	20	700	210
	40	1050	280
	50	1300	315



# Газофазные методы осаждения — напыления



Металлические КМ можно получить также осаждением из газовой фазы, методом испарения и конденсации, катодным распылением и другими способами, которые для формирования МКМ применяются очень редко.

Все чаще МКМ применяют в таких областях современной техники где они должны работать при низких, высоких и сверхвысоких температурах, в агрессивных средах, при статических циклических, ударных, вибрационных и других нагрузках.

Наиболее эффективно применение МКМ в таких конструкциях, особые условия работы которых не допускают применения традиционных металлических материалов.



# Металлические композиционные материалы



В настоящее время особое внимание уделяется бороалюминиевому волокну как одному из первых материалов, определяющих возможность применения МКМ в авиационно-космических конструкциях.

Например, согласно зарубежным данным, применение бороалюминиевого волокна в планере самолета F-106A (M-2) позволило снизить его массу с 3860 до 2990 кг, т.е. на 23 %, увеличить за счет этого на 115 % полезную нагрузку без уменьшения скорости и дальности полета.





# Металлические композиционные материалы



Бороалюминиевые волокна практически сохраняют свои высокие прочностные и упругие свойства до температур 673...773 К. Существенно расширить рабочую температуру бороалюминиевых материалов можно, используя волокна из борсика (волокна бора с нанесенным защитным покрытием карбида кремния).

Об эффективности применения МКМ в авиационной технике можно судить по их использованию в конструкции самолета ИЛ-62 обеспечивающему снижение взлетной массы самолета при сохранении летных характеристик на 17 %, увеличение дальности полета на 15 % и увеличение полезной нагрузки на 20%.





# Металлические композиционные материалы



Применение бороалюминиевых композиций эффективно в космических летательных аппаратах, узлах конструкций, подвергающихся нагреву, в герметических кабинах, для элементов жесткости панелей, кожухов, юбок ракетного двигателя, соединительных отсеков ступеней баллистических ракет.

Легкие МКМ с алюминиевой матрицей, армированной углеродными высокомодульными волокнами, хотя и обладают пределом прочности, незначительно превышающем предел прочности лучших промышленных алюминиевых сплавов, однако имеют значительно более высокий модуль упругости (140...160 ГПа вместо 70 ГПа) при меньшей плотности (2300 ГПа вместо 2750 кг/м<sup>3</sup>).

Особенно велика разница в удельной жесткости, которая для углеалюминиевой композиции в 2,5 раза выше, чем для стандартных сплавов.



# Металлические композиционные материалы



Углеалюминий отличается высокой усталостной прочностью, которая находится на уровне усталостной прочности титана и легированных сталей. Он обладает также малым коэффициентом температурного расширения при изменении температуры в интервале 293...673 К. Указанные свойства дают основание конструкторам использовать материалы в опытных конструкциях таких высоконагруженных деталей, как корпус и сопловые лопатки турбин двигателей самолетов, вертолетов и ракет.

Углеродные волокна используют также в композиции с медными, свинцовыми, цинковыми матрицами в изделиях различного назначения, для которых требуется высокая износостойкость, малый коэффициент трения, высокая электропроводность, хорошая термостабильность и способность сохранять высокие прочностные и упругие свойства при нагреве.



# Металлические композиционные материалы



Армирование свинца углеродными волокнами дает возможность получить МКМ с пределом прочности и модулем упругости более чем в 10 раз выше, чем у неармированного свинца. Это позволяет использовать углесвинец как конструкционный материал для оборудования и аппаратуры, обладающей высокой стойкостью в агрессивных средах, способностью подавлять звуковые колебания, поглощать гамма-излучения и выполнять другие функции.

Для изготовления подшипников, работающих без смазки, успешно опробован антифрикционный МКМ на основе свинца, армированного проволокой из нержавеющей стали или оловянистой бронзой.

Введение арматуры из вольфрама или молибдена в медную и серебряную матрицы позволяет получить износостойкие электрические контакты для сверхмощных высоковольтных выключателей.



# Металлические композиционные материалы



Металлические композиты на основе никеля и хрома, армированные нитевидными кристаллами оксида алюминия, а также композиции, в которых матрица изготовлена из жаропрочных сплавов, а арматура - из высокопрочных тугоплавких волокон являются перспективными для изготовления жаропрочных деталей газотурбинных двигателей.

Специалистами научно-исследовательского центра NASA (США) показана эффективность применения МКМ, полученного методом электролитического осаждения для изготовления камеры высокого давления жидкостного ракетного двигателя. Высокопрочную стальную проволоку наматывали на цилиндрическую оправку с шагом, равным диаметру проволоки, после чего осаждали плотный, беспористый слой никеля. Испытания показали, что использование стальной проволоки повышает прочность цилиндра не менее чем на 50 %.



# Металлические композиционные материалы



Области применения МКМ практически не ограничены. К настоящему времени работы по созданию конструкций из них вышли далеко за рамки научных исследований и в ближайшие годы следует ждать их широкого внедрения.



Рассмотрим общую классификацию процессов получения и обработки композитов с металлической матрицей

Классификация процессов получения и обработки МКМ в зависимости от агрегатного состояния матрицы представлена на рисунке далее (слайд 46).

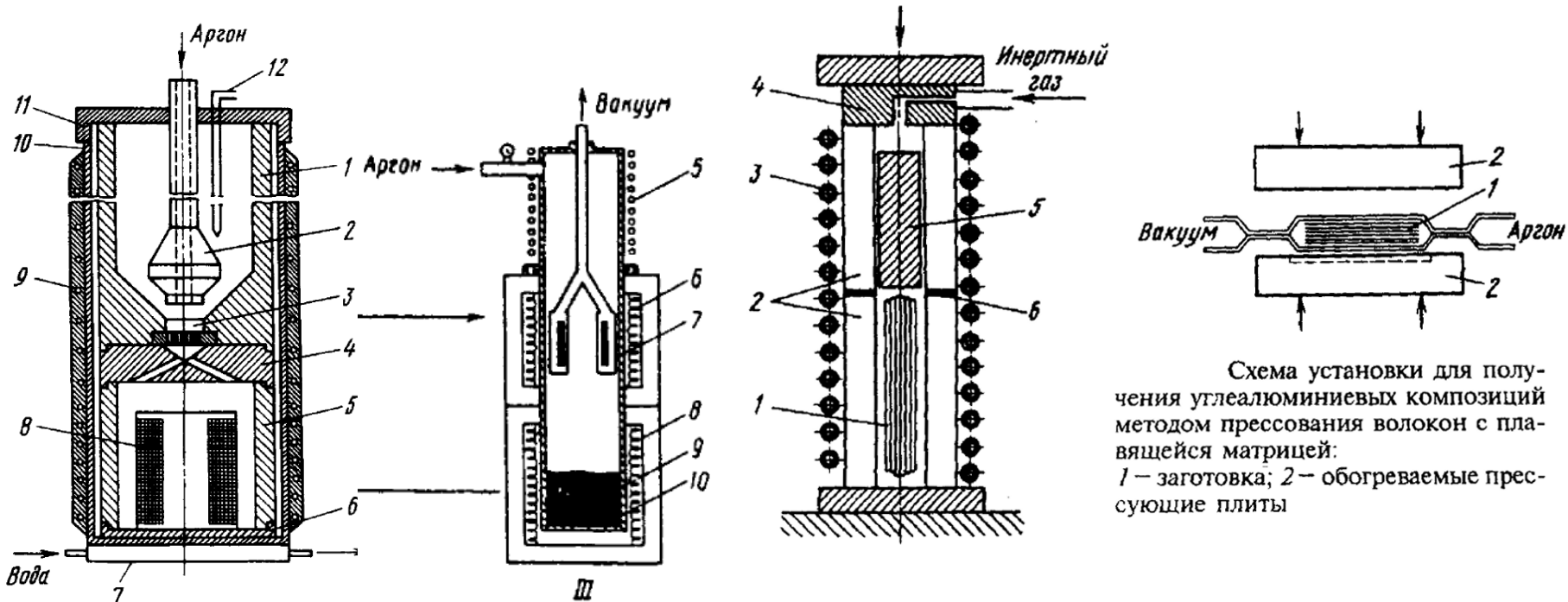


Схема установки для получения углеалюминиевых композиций методом прессования волокон с плавящейся матрицей:  
 1 – заготовка; 2 – обогреваемые прессующие плиты



# Общая классификация процессов получения и обработки композитов с металлической матрицей





# 1. Жидкофазные методы изготовления деталей из металлокомпозитов



Газо- и парофазный методы используют в основном для нанесения технологических покрытий на волокна и детали для придания им особых свойств.

В производстве конструкционных композитов наибольшее развитие получили твердофазные процессы.

В качестве полуфабрикатов при изготовлении и обработке деталей из металлокомпозитов на предварительной стадии используют:

- волокна с покрытиями, пропитанные жгуты,
- плетеные «ремни», сетки,
- пористые ленты с одним слоем волокон.

В дальнейшем эти элементы применяют как элементы сборки многослойных заготовок.



# Жидкофазные методы изготовления деталей из металлокомпозитов



Компактированием этих заготовок получают полуфабрикаты:

- ленты,
- листы,
- полосы,
- плиты,
- трубы,
- проволоки.

Эти полуфабрикаты подвергаются процессам формообразования, раскроя, сварки, механической обработки. В отдельных случаях процессы формообразования и компактирования совмещены, т.е. изготовление изделий может быть одно- либо двухстадийным.

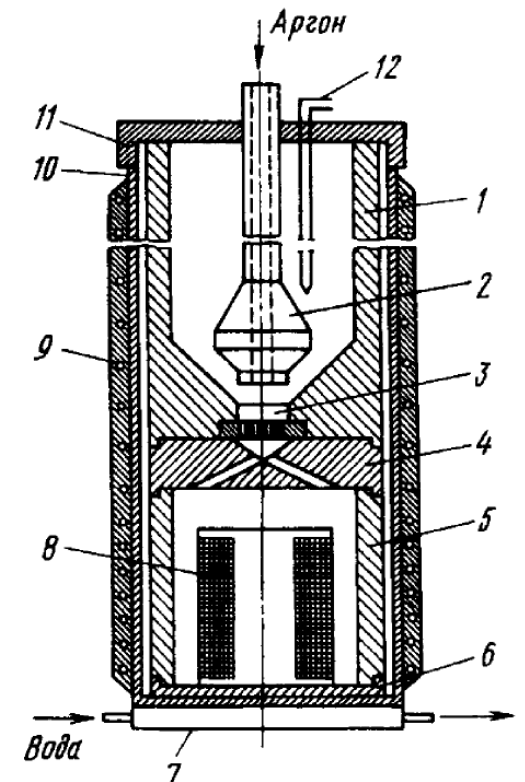


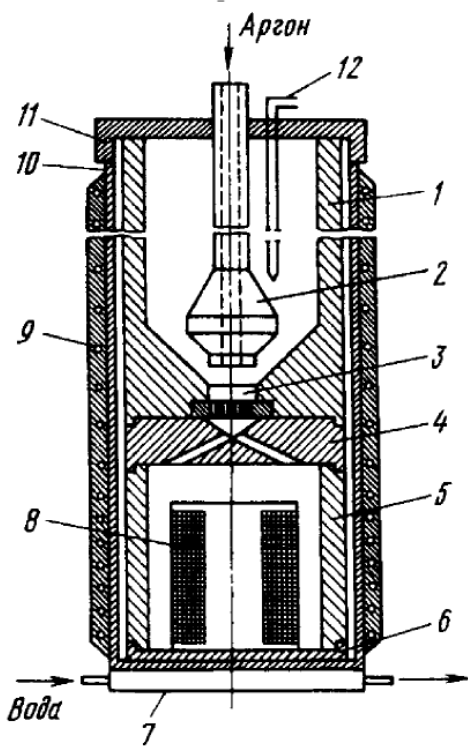
# 1.1 Пропитка заготовок в инертной среде



Вследствие высокой реакционной способности большинства армирующих материалов в контакте с металлическими матрицами требуется проводить операции пропитки отформованных заранее заготовок в среде инертных газов.

Установка для получения КМ методом пропитки в инертной атмосфере состоит из плавильного тигля и заливочной камеры, выполненных из графита и заключенных в контейнер. Снаружи контейнера расположен нихромовой нагреватель мощностью 5 кВт, изолированный от контейнера термоизоляционным цементом.





**Рис. 3.2.** Схема установки для пропитки:

1 – графитовый тигель; 2 – запорный плунжер; 3 – фильтр (графит); 4 – пробка с коллектором и питателями (графит); 5 – заливочная камера (графит); 6 – дно (графит); 7 – холодильник (коррозионно-стойкая сталь); 8 – заготовка из армирующего материала; 9 – нагреватель (нихром); 10 – контейнер (коррозионно-стойкая сталь); 11 – крышка (графит); 12 – термопара

Нижняя часть плавильного тигля имеет коническую форму, соответствующую форме запорного плунжера. Между плавильным тиглем и заливочной камерой установлен графитовый фильтр с отверстиями небольшого диаметра и графитовая пробка с коническим коллектором и двумя питателями..

Сверху установка закрыта крышкой, а в нижней ее части расположен холодильник с проточной водой. Подача инертного газа - аргона - осуществляется через отверстие в запорном плунжере. Температура расплава измеряется в тигле термопарой.

Установка работает следующим образом.

В заливочную камеру помещают заготовку из армирующего материала. В контейнер устанавливают графитовую пробку и плавильный тигель. В тигель, нижнее отверстие которого закрыто запорным плунжером, загружают материал матрицы. Контейнер закрывают крышкой, и через отверстие в плунжере его полость заполняется аргоном. Затем осуществляется нагрев и расплавление матричного материала, после чего плунжер поднимают вверх, и матрица, заполняя заливочную камеру, пропитывает заготовку из армирующего материала.

Этим методом изготавливают детали, имеющие форму тел вращения, детали коробчатого сечения и другие.

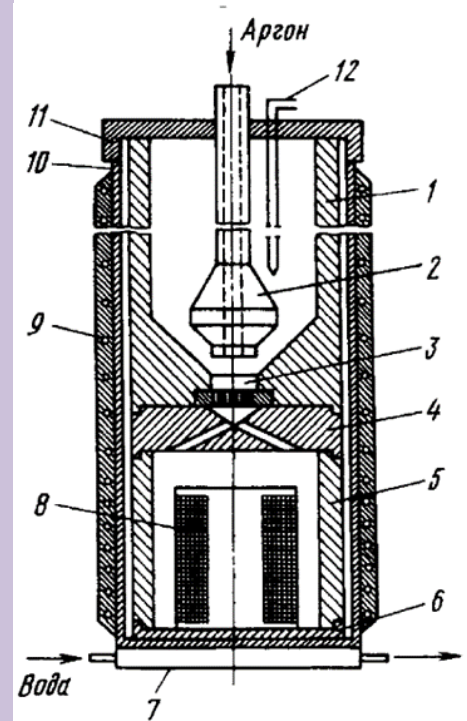


Схема установки для пропитки:

1 – графитовый тигель; 2 – запорный плунжер; 3 – фильтр (графит); 4 – пробка с коллектором и питателями (графит); 5 – заливочная камера (графит); 6 – дно (графит); 7 – холодильник (коррозионно-стойкая сталь); 8 – заготовка из армирующего материала; 9 – нагреватель (нихром); 10 – контейнер (коррозионно-стойкая сталь); 11 – крышка (графит); 12 – термопара



## 1.2. Вакуумно-компрессионная пропитка



Особенность технологии МКМ заключается в том, что применение какого-либо одного из известных технологических процессов не позволяет получить компактный материал, обладающий требуемыми свойствами.

При изготовлении таких материалов весьма часто приходится прибегать к последовательному осуществлению двух и более технологических процессов, например:

- плазменного напыления и последующего горячего прессования,
- горячего прессования и последующей прокатки и т.д.

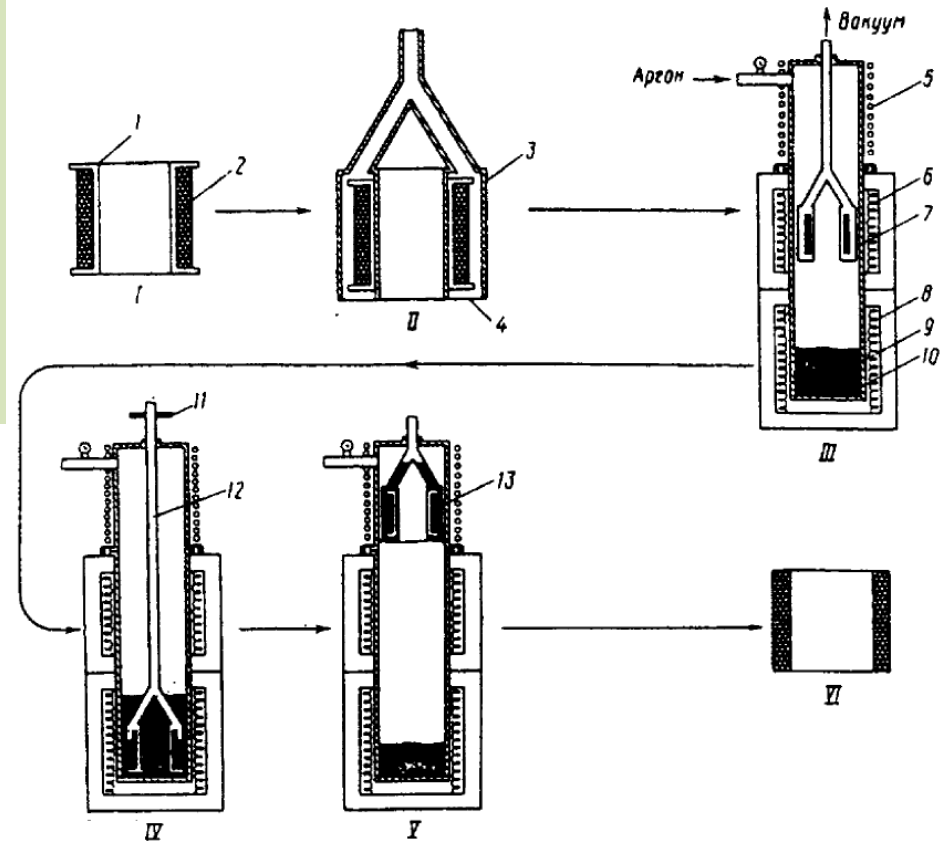
К одному из таких комбинированных методов изготовления МКМ относится и вакуумно-компрессионная пропитка, сочетающая в себе элементы вакуумной пропитки и литья под давлением.

Схема одной из установок, предназначенных для получения МКМ методом вакуумно-компрессионной пропитки, показана на рисунке далее.

Установка представляет собой камеру, имеющую две зоны нагрева:

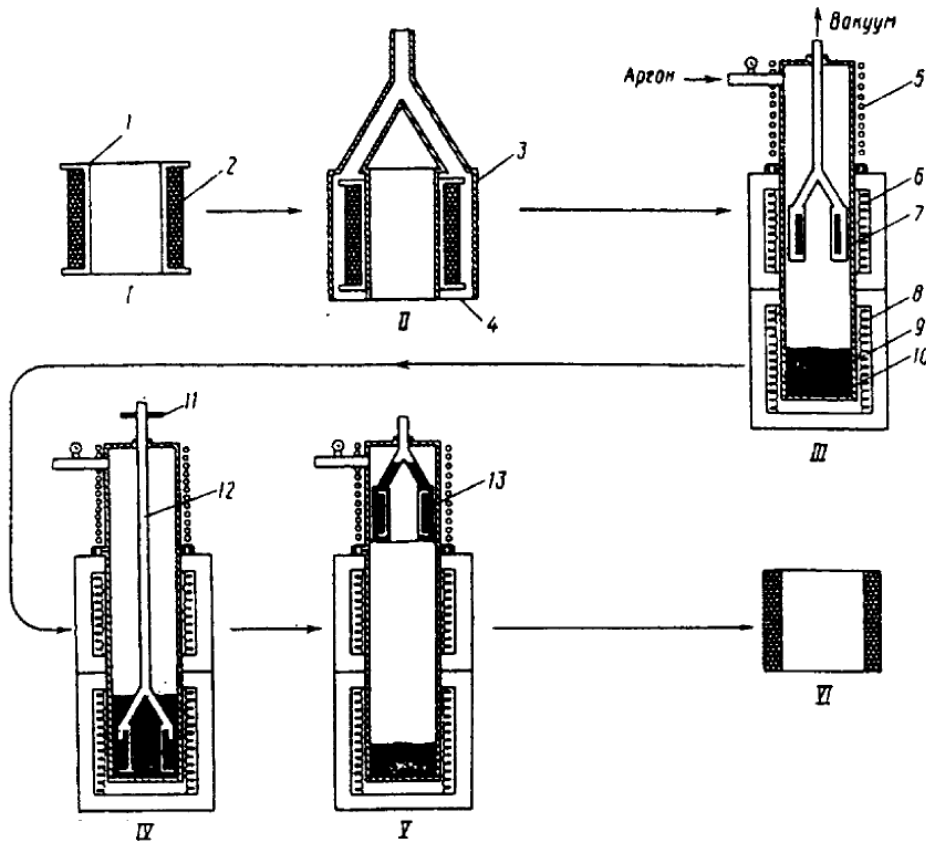
- зону предварительного нагрева формы с упрочнителем;
- зону плавления матричного металла, являющуюся одновременно и зоной пропитки.

Нагрев этих зон осуществляется с помощью двух печей, установленных на разных уровнях по высоте снаружи камеры. Сверху камера герметично закрыта крышкой.



Последовательные стадии изготовления КМ методом вакуумно-компрессионной пропитки:

I – намотка волокна на цилиндрическую оправку; II – установка в форму; III – предварительный нагрев; IV – пропитка; V – охлаждение; VI – разборка, удаление формы и избытка металла и извлечение трубы из КМ; 1 – оправка; 2 – волокно; 3 – вакуумированная форма; 4 – тонкостенное дно (0,15 мм); 5 – холодильник; 6 – печь предварительного нагрева; 7 – форма с волокном; 8 – печь для плавления металла; 9 – расплав матрицы; 10 – иглы для прокалывания дна формы; 11 – рукоятка; 12 – шток; 13 – металл, заполнивший форму



Последовательные стадии изготовления КМ методом вакуумно-компрессионной пропитки:

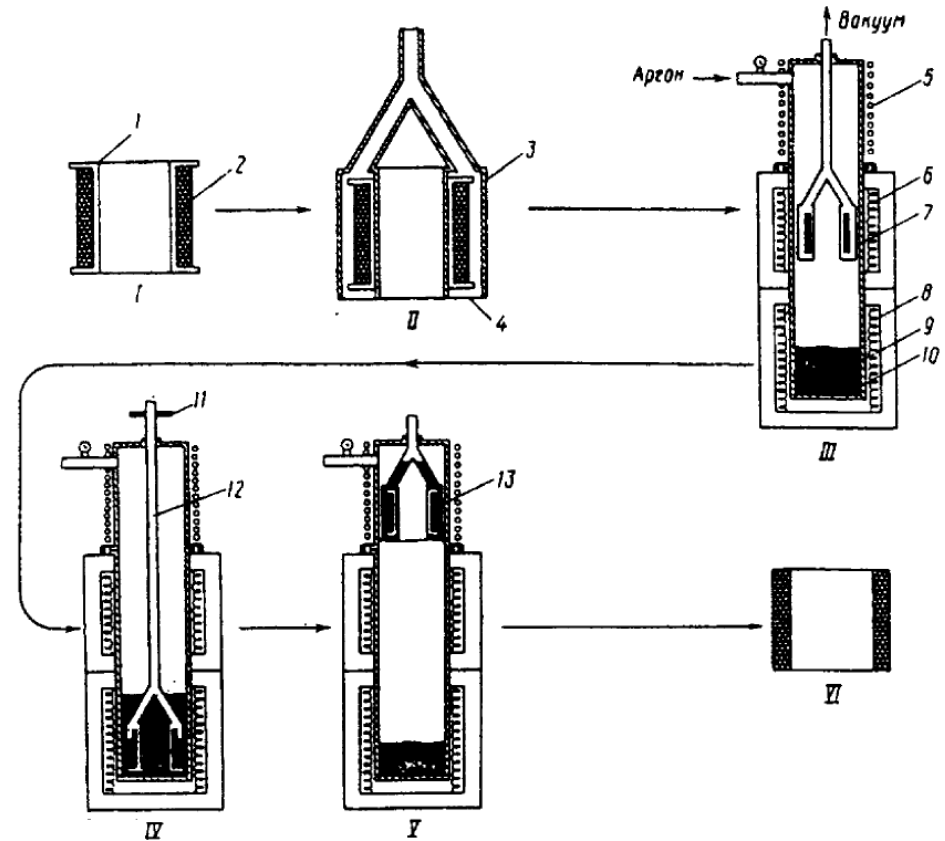
I – намотка волокна на цилиндрическую оправку; II – установка в форму; III – предварительный нагрев; IV – пропитка; V – охлаждение; VI – разборка, удаление формы и избытка металла и извлечение трубы из КМ; 1 – оправка; 2 – волокно; 3 – вакуумированная форма; 4 – тонкостенное дно (0,15 мм); 5 – холодильник; 6 – печь предварительного нагрева; 7 – форма с волокном; 8 – печь для плавления металла; 9 – расплав матрицы; 10 – иглы для прокалывания дна формы; 11 – рукоятка; 12 – шток; 13 – металл, заполнивший форму

В крышке имеется отверстие с уплотнением, в котором перемещается вверх и вниз полый шток контейнера с загруженным в него упрочнителем.

Контейнер представляет собой герметичную металлическую оболочку, дно которой, по сравнению со стенками, имеет меньшую толщину.

На представленном здесь рисунке контейнер имеет форму, позволяющую изготовить из КМ изделия в виде колец. Шток контейнера связан с вакуумным насосом.

Крышка камеры имеет патрубок, через который в камеру под давлением подается инертный газ. Для предотвращения нагрева уплотнения штока контейнера в крышке имеется холодильник, выполненный в виде навитой на него по спирали металлической трубки, через которую непрерывно подается вода.



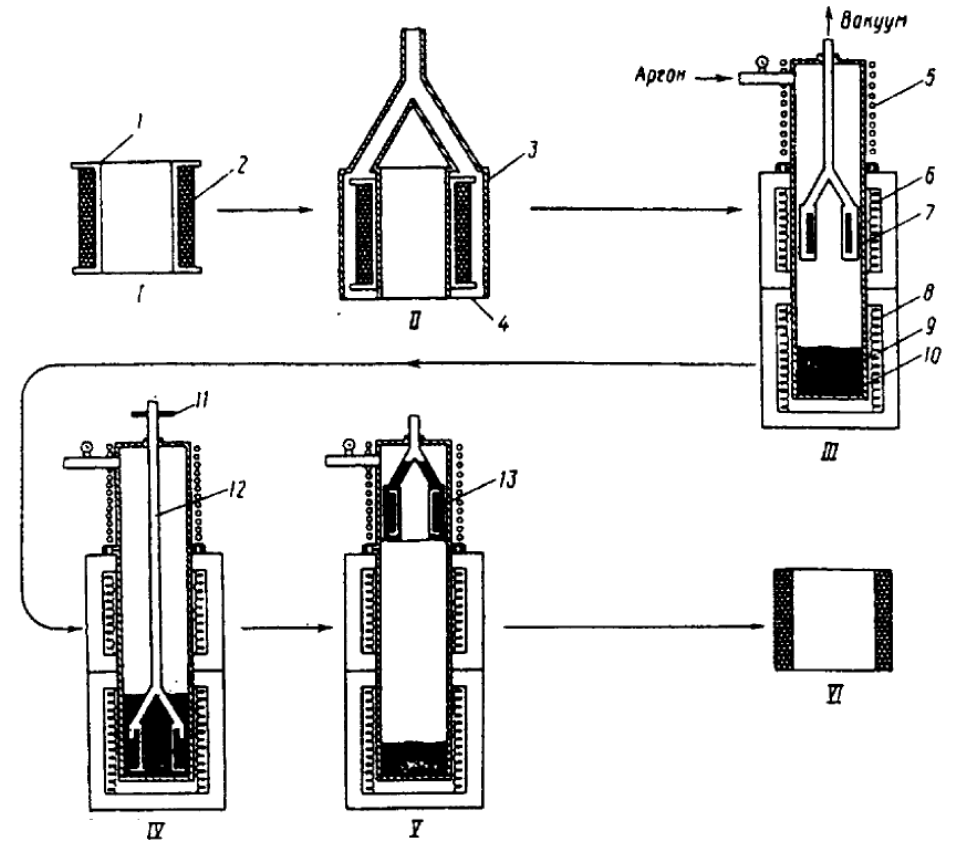
Последовательные стадии изготовления КМ методом вакуумно-компрессионной пропитки:

I – намотка волокна на цилиндрическую оправку; II – установка в форму; III – предварительный нагрев; IV – пропитка; V – охлаждение; VI – разборка, удаление формы и избытка металла и извлечение трубы из КМ; 1 – оправка; 2 – волокно; 3 – вакуумированная форма; 4 – тонкостенное дно (0,15 мм); 5 – холодильник; 6 – печь предварительного нагрева; 7 – форма с волокном; 8 – печь для плавления металла; 9 – расплав матрицы; 10 – иглы для прокалывания дна формы; 11 – рукоятка; 12 – шток; 13 – металл, заполнивший форму

Рассмотрим технологический процесс вакуумно-компрессионной пропитки, схема которого также показана рисунке.

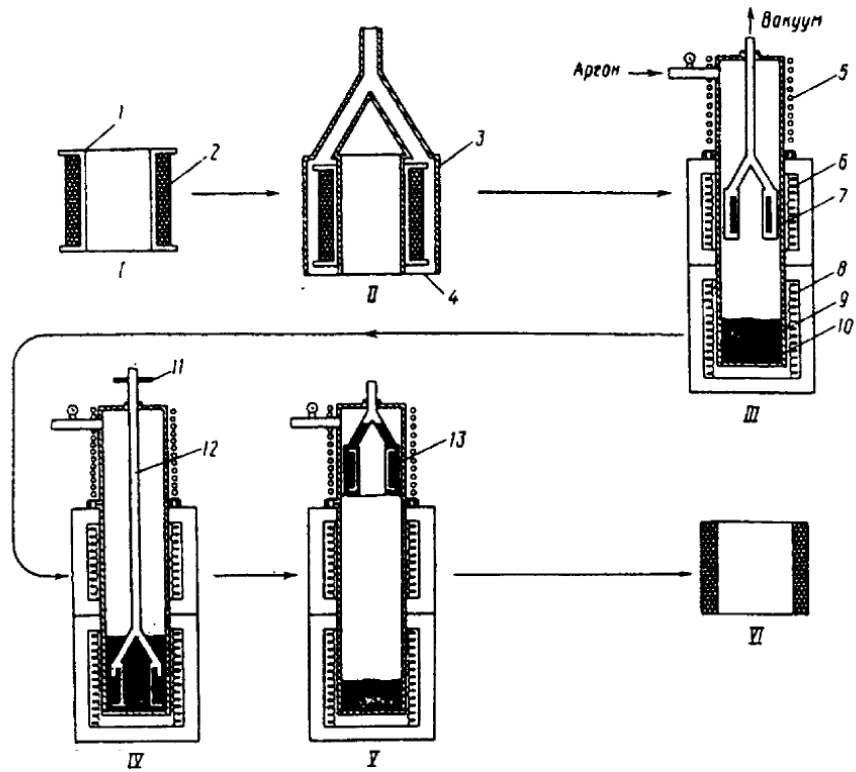
Упрочняющие волокна укладывают в контейнер, внутренняя часть которого изготовлена по форме будущего изделия.

На приведенной схеме изображен контейнер для получения кольца и поэтому волокно в данном случае предварительно наматывается на специальную оправку, вместе с которой загружается в контейнер.



Последовательные стадии изготовления КМ методом вакуумно-компрессионной пропитки:

I – намотка волокна на цилиндрическую оправку; II – установка в форму; III – предварительный нагрев; IV – пропитка; V – охлаждение; VI – разборка, удаление формы и избытка металла и извлечение трубы из КМ; 1 – оправка; 2 – волокно; 3 – вакуумированная форма; 4 – тонкостенное дно (0,15 мм); 5 – холодильник; 6 – печь предварительного нагрева; 7 – форма с волокном; 8 – печь для плавления металла; 9 – расплав матрицы; 10 – иглы для прокалывания дна формы; 11 – рукоятка; 12 – шток; 13 – металл, заполнивший форму



Последовательные стадии изготовления КМ методом вакуумно-компрессорной пропитки:

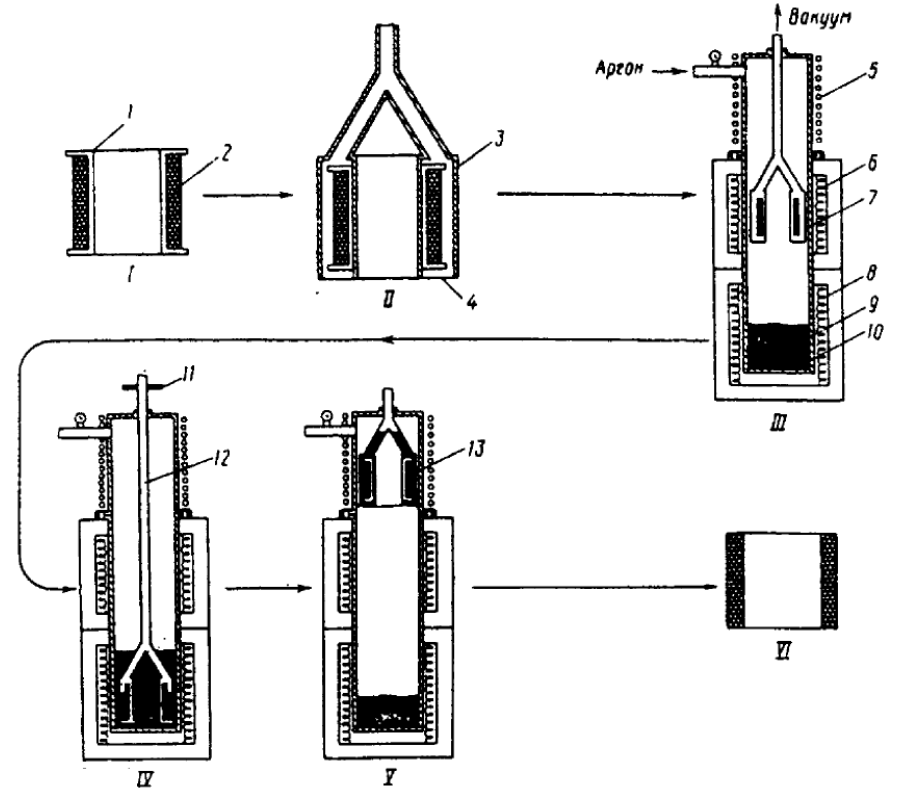
I – намотка волокна на цилиндрическую оправку; II – установка в форму; III – предварительный нагрев; IV – пропитка; V – охлаждение; VI – разборка, удаление формы и избытка металла и извлечение трубы из КМ; I – оправка; 2 – волокно; 3 – вакуумированная форма; 4 – тонкостенное дно (0,15 мм); 5 – холодильник; 6 – печь предварительного нагрева; 7 – форма с волокном; 8 – печь для плавления металла; 9 – расплав матрицы; 10 – иглы для прокалывания дна формы; 11 – рукоятка; 12 – шток; 13 – металл, заполнивший форму

В нижнюю часть камеры, выполненную в виде тигля, помещают металл матрицы. Крышку вместе с контейнером устанавливают на камере и герметично закрепляют. Полюс штока контейнера подключают к вакуумной системе, и контейнер вакуумируется.

Затем контейнер устанавливают в зону предварительного нагрева, а в камеру под нужным давлением подают инертный газ. Включают печи, обогревающие зоны предварительного нагрева и плавления металла матрицы, при этом в холодильник подают воду.

Когда матричный металл и волокно подогриваются до нужной температуры, контейнер опускается в расплавленный металл и его дно накаливается на иглы, расположенные на дне тигля с расплавом.

В результате вакуума в контейнере, а также избыточного давления газа в камере, расплавленный металл заполняет контейнер с волокном. После пропитки контейнер поднимают в холодильник, где происходит кристаллизация матричного расплава. Затем изделие извлекают из контейнера и подвергают механической обработке.



Последовательные стадии изготовления КМ методом вакуумно-компрессионной пропитки:

I – намотка волокна на цилиндрическую оправку; II – установка в форму; III – предварительный нагрев; IV – пропитка; V – охлаждение; VI – разборка, удаление формы и избытка металла и извлечение трубы из КМ; 1 – оправка; 2 – волокно; 3 – вакуумированная форма; 4 – тонкостенное дно (0,15 мм); 5 – холодильник; 6 – печь предварительного нагрева; 7 – форма с волокном; 8 – холодильник; 9 – печь для плавления металла; 10 – иглы для прокалывания дна формы; 11 – рукоятка; 12 – шток; 13 – металл, заполнивший форму



# Вакуумно-компрессионная пропитка



В результате подбора оптимальных температурных условий, удачной комбинации вакуума и давления, совершенствования конструкции формы можно получить плоские и кольцевые образцы для испытания при растяжении, практически не имеющие усадочных пор горячих трещин и непропитанных участков между волокнами.

Путем вакуумирования каркаса волокон перед пропиткой устраняют в форме отверстия для прохода металла и тем самым исключают контроль за расходом металла.

В связи с этим появляется возможность получать, например, кольцевые образцы намоткой волокна на твердую оправку и пропиткой расплавленным металлом, поступающим только с наружной поверхности намотанного каркаса в результате погружения оправки в расплавленный металл. Наличие избыточного давления необходимо в том случае, когда расстояния между волокнами очень малы, либо при плохой смачиваемости.



Чтобы устранить усадочную пористость, в конструкции формы делают выпоры и осуществляют подогрев ее верхней части.

Для обеспечения качественной пропитки необходим тщательный расчет теплоемкости системы, учитывающий температуру подогрева, массу волокна, оправки или формы, объем выпоров и др. Так, например, если волокна не подогреты до необходимой температуры, то матрица затвердеет прежде, чем произойдет полная пропитка.

Этим методом в основном получают заготовки деталей из углеалюминиевых композиций, поскольку применение других методов жидкофазного совмещения углеродных волокон и металлической матрицы приводит к интенсивному разрушению волокна.

Известны две схемы этого процесса

## Метод пропитки

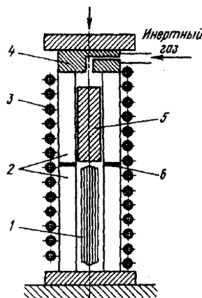


Схема установки для получения углеалюминиевых композиций методом пропитки:  
1 – углеродное волокно; 2 – графитовая форма; 3 – индуктор; 4 – крышка; 5 – металл матрицы; 6 – прокладка

## Метод прессования волокон с плавающей матрицей

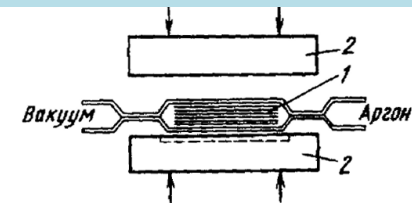


Схема установки для получения углеалюминиевых композиций методом прессования волокон с плавающей матрицей:  
1 – заготовка; 2 – обогреваемые прессующие плиты

В соответствии с первой схемой применяют две графитовые формы, помещенные в индуктор, разделенные прокладкой и сжатые по концам специальными крышками, обеспечивающими необходимую герметичность.

В нижнюю форму помещают углеродную заготовку, в верхнюю — металл для пропитки. Пропитка осуществляется в результате расплавления металла матрицы в индукторе и подачи его в форму с заготовкой под давлением аргона (0,5...1,0 МПа). Время пропитки при этом составляет несколько минут.

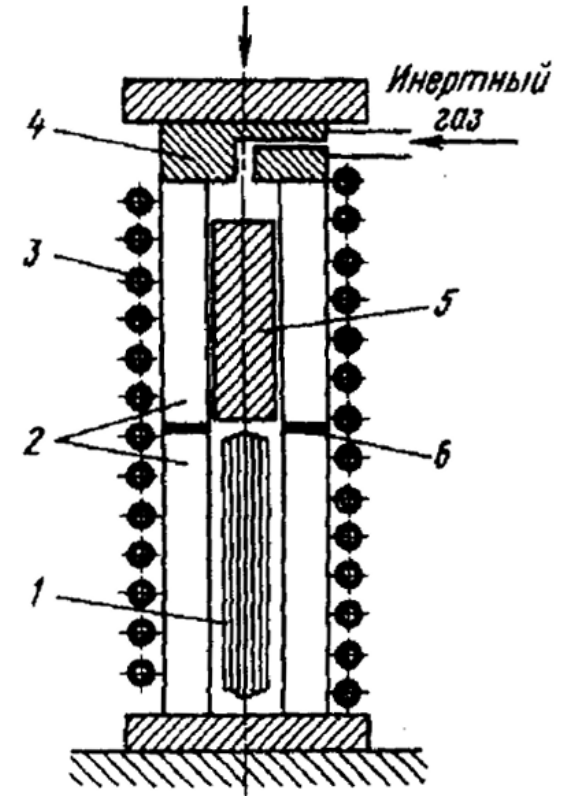


Схема установки для получения углеалюминиевых композиций методом пропитки:

1 – углеродное волокно; 2 – графитовая форма; 3 – индуктор; 4 – крышка; 5 – металл матрицы; 6 – прокладка

Согласно второй схеме, заготовку с чередующимися слоями матрицы и волокна укладывают в герметичный металлический контейнер, который вначале продувается аргоном, а затем вакуумируется. Контейнер помещают между обогреваемыми плитами пресса и при достижении температуры, близкой к температуре плавления матрицы, сжимают под давлением порядка 15...20 МПа.

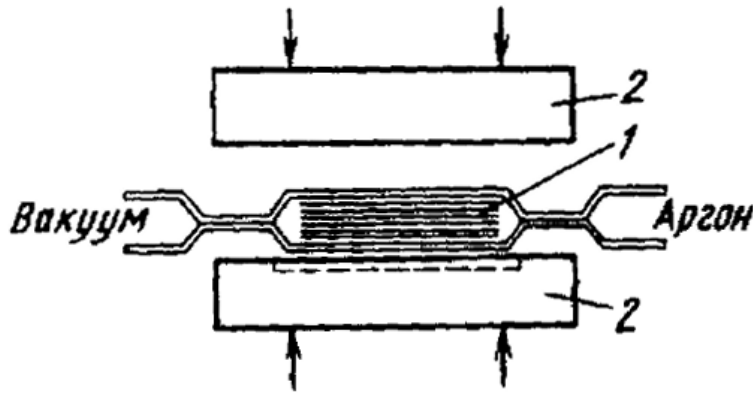


Схема установки для получения углеалюминиевых композиций методом прессования волокон с плавающей матрицей:

1 – заготовка; 2 – обогреваемые прессующие плиты

В момент расплавления матричного материала давление увеличивают и выдерживают его в течение всего процесса кристаллизации. Для углеалюминиевых композиций это давление составляет порядка

55 МПа, а время кристаллизации – около 3 мин. Метод позволяет получать металлокомпозит, объемное содержание волокна в котором находится в диапазоне 25...35 %.



## 2. Твердофазные методы изготовления деталей из металлокомпозитов



### 2.1. Диффузионная сварка

Этот метод формообразования относится к методам твердофазного совмещения матрицы и волокна. Диффузионную сварку используют в промышленности для соединения различных однородных и разнородных металлов и сплавов.

Процесс сварки происходит без расплавления основного металла в результате нагрева и сдавливания соединяемых деталей. В месте сварки деталей осуществляется диффузия одного металла в другой. Обычно при соединении деталей методом диффузионной сварки их поверхности тщательно зачищают и подгоняют, а сам процесс сварки проводят в вакууме.



# Диффузионная сварка



Процесс диффузионной сварки под давлением является одним из наиболее часто применяемых методов изготовления МКМ. Этот процесс по технологическим параметрам и аппаратному оформлению незначительно отличается от процесса диффузионной сварки как метода соединения двух деталей из однородных или разнородных материалов.

В данном случае суть метода состоит в получении компактного материала или готовой детали из нескольких разнородных по составу, форме и размерам элементов, образующих матрицу и упрочнитель КМ.

Поскольку в состав КМ обычно входят пластичная малопрочная матрица и упрочнитель, обладающий, как правило, более высокой твердостью по сравнению с твердостью матрицы, то этот упрочнитель в процессе диффузионной сварки под давлением может разрушать оксидные слои, покрывающие поверхность металлической матрицы.



# Диффузионная сварка



В связи с этим процесс диффузионной сварки упрощается: если для соединения деталей методом диффузионной сварки почти всегда необходимо создавать вакуум над поверхностями соединяемых деталей, то для изготовления деталей этим методом не всегда необходим вакуум, и процесс можно проводить в инертной, а иногда и в воздушной среде.

Следует отметить, что и в случае получения КМ методом диффузионной сварки под давлением наличие вакуума является фактором, интенсифицирующим процесс и улучшающим его качество.

Другой важный отличительный признак этого процесса состоит в том, что процесс получения КМ обычно связан с пластическим течением матрицы, необходимым для заполнения пространства между элементами упрочнителя, происходящим обычно в замкнутом объеме. При соединении деталей диффузионным методом пластическая деформация отсутствует.



# Диффузионная сварка



Для изготовления методом диффузионной сварки различных полуфабрикатов и деталей из КМ необходимо использовать специальное оборудование и оснастку, а также мощные прессы, автоклавы, изостаты и др.

В процессе изготовления КМ необходимым условием является обеспечение пластической деформации, что связано со значительным повышением технологических параметров процесса – температуры, давления и времени выдержки при прессовании по сравнению с аналогичными параметрами процесса соединения диффузионной сваркой двух деталей.

Однако в целом технологическому процессу изготовления КМ диффузионной сваркой под давлением присущи все основные показатели, характеризующие собственно процесс диффузионной сварки двух деталей, такие как подготовка соединяемых контактирующих поверхностей, нагрев соединяемых элементов, создание давления, время выдерживания параметров при этих условиях и др.



# Диффузионная сварка



Принципиальная схема изготовления этим методом КМ представлена на рисунке.

Основными операциями технологического процесса являются подготовка поверхности контактирующих материалов, изготовление предварительных заготовок, раскрой и сборка пакетов и прессование.



Технологическая схема производства полуфабрикатов и изделий методом диффузионной сварки



# Диффузионная сварка. Исходные материалы



Матрицу в исходном состоянии чаще всего используют в виде фольги металлов или сплавов. Иногда матрицу применяют в виде слоев, нанесенных на упрочнитель тем или иным методом. Упрочнителями в этом случае являются нитевидные кристаллы, волокна и проволоки из различных металлов или сплавов

Нитевидные кристаллы, волокна и проволоки можно применять как в виде отдельных кристаллов, моноволокон и проволок, так и в виде различных полуфабрикатов: матов, жгутов, тканей, сеток и др. Кроме того, упрочнители часто применяют в виде своеобразного предварительного КМ, представляющего собой отдельные кристаллы, волокна или проволоки, объединенные в матрицу. При этом материал матрицы можно наносить на упрочнитель, используя методы плазменного напыления, химического и электрохимического осаждения, осаждения из газовой фазы, протяжки волокна через расплав матрицы и др.



# Диффузионная сварка



Технологический процесс получения КМ методом диффузионной сварки под давлением основан на диффузии элементов, входящих в состав матрицы и упрочнителя. Диффузионные процессы, способствующие образованию компактного материала из компонентов матрицы и упрочнителя, протекают главным образом на границах раздела матрица—упрочнитель и матрица—матрица, т.е. практически на поверхностях матрицы и упрочнителя. В связи с этим существенное влияние на качество процесса и качество полученного методом диффузионной сварки КМ оказывает состояние контактирующих поверхностей матрицы и упрочнителя.

Волокна, проволоки и нитевидные кристаллы, применяемые в качестве упрочнителей, перед процессом диффузионной сварки чаще всего подвергают поверхностной очистке химическими методами. Это связано с наличием на поверхности упрочнителей различного вида замасливателей, смазок, применяемых в процессе изготовления волокон и проволок, тонких слоев оксидов и др.



# Диффузионная сварка



Такую очистку осуществляют в щелочных или кислотных травителях. С целью повышения прочности связи на границе раздела упрочнителя с матрицей на поверхность волокон и нитевидных кристаллов в некоторых случаях наносят покрытие из металла или их соединений методами химического, электрохимического осаждения, осаждения из газовой фазы и др.

Как было отмечено выше, при изготовлении КМ методом диффузионной сварки под давлением матрицу чаще всего применяют в виде фольги. Поверхность фольги из металлов и сплавов может быть загрязнена различными смазками, применяемыми в процессе ее изготовления, может быть покрыта слоем оксида, затрудняющим протекание диффузионных процессов. Наличие плотной оксидной пленки особенно характерно для фольги из алюминия и его сплавов. К основным методам подготовки поверхности материала матрицы относятся промывка, обезжиривание, механическая очистка, химическая обработка.



# Диффузионная сварка



Промывку применяют главным образом для очистки поверхности фольги от различного вида поверхностных загрязнений и осуществляют в спирте, горячей и холодной воде, в различных моющих средствах. Обезжиривание применяют в тех случаях, когда поверхность фольги загрязнена маслами, чаще всего входящими в состав смазок, применяемых при прокатке. Обезжиривание проводят в бензине, ацетоне, четыреххлористом углероде, дихлорэтане и специальных растворителях, в состав которых обычно входят перечисленные выше вещества.

Механическая обработка является более радикальным средством очистки поверхности фольги, поскольку этот метод связан с удалением на небольшую глубину поверхностных слоев материала. Она позволяет не только очистить поверхность фольги, но и удалить оксидный слой, а также обнажить внутренние, неокисленные и поэтому более активные для прохождения диффузионных процессов слои матрицы. Механическую обработку можно осуществлять с помощью шлифовальной бумаги, металлических щеток, абразивного инструмента. Для удаления частиц металла и абразива, оставшихся на поверхности фольги после такой обработки, обычно применяют промывку.



# Диффузионная сварка



Химическая обработка также сопровождается удалением на некоторую глубину поверхностных слоев материала матрицы. Обычно эта обработка включает в себя операции обезжиривания, щелочное или кислотное травление и иногда сочетание того и другого, пассивирование поверхности. После каждой из перечисленных операций обязательно применяют промывку.

Реактивы для химической обработки специально подбирают для каждой матрицы. Технологические параметры процесса химической обработки, такие как концентрация травителей, температура и время обработки, определяют экспериментально из условий обеспечения необходимого качества поверхностных слоев, сохранения этого качества в течение некоторого времени (включающего промежуток между операциями химической обработки и диффузионной сварки) и съема поверхностных слоев матрицы заданной толщины.



# Диффузионная сварка



Последнее условие связано с тем, что матрицу обычно используют в виде фольги малой толщины (0,007...0,1 мм), поэтому удаление с поверхности слоя в несколько микрон в дальнейшем может значительно изменить соотношение матрицы и упрочнителя в КМ.

В соответствии с методом диффузионной сварки под давлением КМ получают прессованием в вакууме при определенной температуре и давлении в среде инертных газов или воздухе.



## 2.2. Прессование

Основной операцией процесса изготовления КМ методом диффузионной сварки под давлением является прессование. Именно при выполнении этой операции происходит соединение отдельных элементов предварительных заготовок в компактный материал (формирование изделий).

В отличие от прессования как метода обработки давлением металлов и сплавов, заключающегося в выдавливании металла из замкнутой полости через отверстие в матрице и связанного с большими степенями деформации обрабатываемого материала, данный процесс по существу больше соответствует процессу прессования порошковых материалов, применяемому в порошковой металлургии.

Прессование заготовок композитов в большинстве случаев осуществляется в замкнутом объеме (в пресс-формах, состоящих из матрицы и двух пуансонов типа пресс-форм, применяемых для получения изделий из металлических порошков) и с незначительной пластической деформацией материала матрицы, необходимой только для заполнения пространства между волокнами упрочнителя и максимального уплотнения самой матрицы.



При таком прессовании, как и в случае горячего прессования порошков, наряду с пластической деформацией матрицы на границе раздела между слоями или частицами матрицы, т.е. на границе матрица—матрица, а также на границе матрица—волокно, протекают диффузионные процессы, обеспечивающие прочную связь на этих границах и, в конечном счете, необходимую прочность КМ.

К основным технологическим параметрам прессования КМ относятся:

- давление прессования;
- температура;
- время выдержки;
- среда, в которой осуществляется процесс.



# Прессование



В зависимости от технологического оформления можно выделить четыре разновидности процесса прессования:

- 1) прессование в замкнутых пресс-формах и между обогреваемыми плитами;
- 2) ступенчатое прессование;
- 3) изостатическое или автоклавное прессование;
- 4) динамическое горячее прессование.



## 2.2.1. Прессование в пресс-формах и между обогреваемыми плитами



В этом случае прессование КМ можно осуществлять на обычных гидравлических прессах различной мощности, применяемых для обработки металлов давлением, в порошковой металлургии, в производстве пластмасс. Для обеспечения пригодности пресса в процессе диффузионной сварки необходимым условием является возможность поддерживать заданное давление на нем в течение длительного времени.

Прессование изделий из КМ на таких прессах проводят в специальных пресс-формах, нагреваемых тем или иным способом до нужной температуры. Диффузионную сварку можно осуществлять на воздухе, в вакууме и защитной среде. В зависимости от этого пресс, на котором ее проводят, может быть оснащен камерой для создания вакуума или необходимого давления.

В качестве примера одной из таких установок, применяемой для получения методом диффузионной сварки КМ, рассмотрим установку, представляющую собой гидравлический пресс с вакуумной камерой.

Нижняя часть разъемного корпуса камеры через сильфон связана со штоком пресса, на который устанавливают пакет из заготовок КМ. В верхнюю часть корпуса вмонтирован индуктор

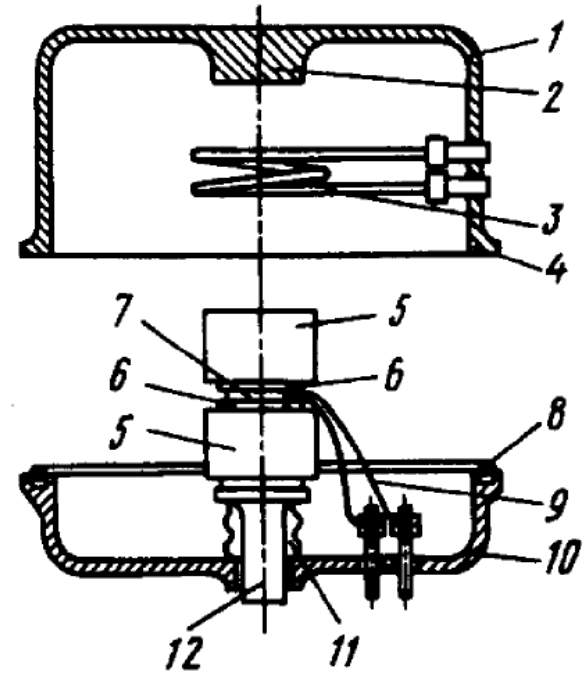
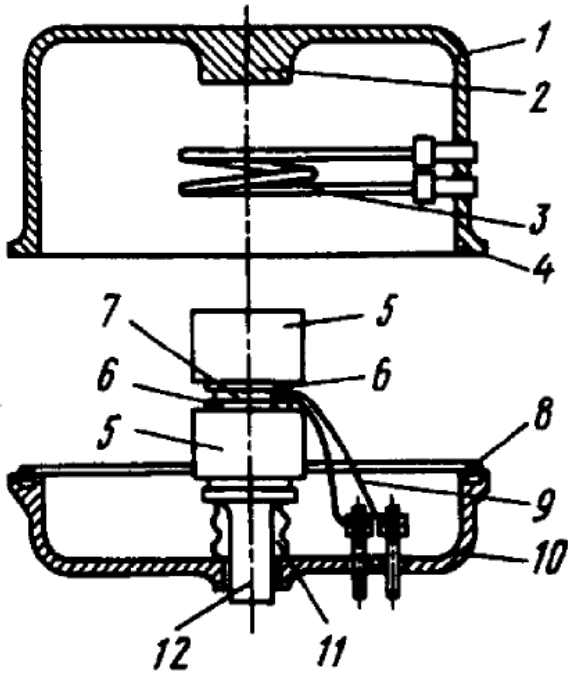


Схема установки для горячего прессования:

1 – корпус камеры; 2 – упор; 3 – индуктор; 4 – плоскость разъема камеры; 5 – огнеупорные плиты; 6 – пластины; 7 – прессуемый пакет; 8 – уплотнительная резина; 9 – термопара; 10 – стол; 11 – сильфон; 12 – шток пресса

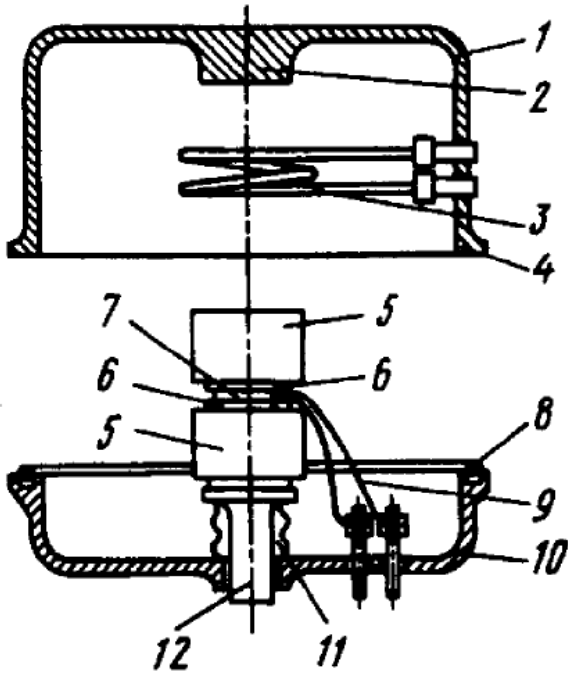


В рабочем состоянии, т.е. при сомкнутых верхней и нижней частях корпуса, пакет расположен внутри индуктора. Детали пресса и корпус камеры для предотвращения нагрева пакета изолируют от штока пресса и упора верхней части корпуса изоляционными огнеупорными плитами из хромомagneзита.

Схема установки для горячего прессования:

1 – корпус камеры; 2 – упор; 3 – индуктор; 4 – плоскость разъема камеры; 5 – огнеупорные плиты; 6 – пластины; 7 – прессуемый пакет; 8 – уплотнительная резина; 9 – термопапера; 10 – стол; 11 – сильфон; 12 – шток пресса

Для обеспечения равномерного нагрева пакета между ним и огнеупорными плитами устанавливают более массивные по сравнению с пакетом молибденовые пластины, в результате чего основная часть магнитного потока, создаваемого индуктором, поглощается этими пластинами.



В рабочем состоянии, т.е. при сомкнутых верхней и нижней частях корпуса, пакет расположен внутри индуктора. Детали пресса и корпус камеры для предотвращения нагрева пакета изолируют от штока пресса и упора верхней части корпуса изоляционными огнеупорными плитами из хромомagneзита.

Схема установки для горячего прессования:

1 – корпус камеры; 2 – упор; 3 – индуктор; 4 – плоскость разъема камеры; 5 – огнеупорные плиты; 6 – пластины; 7 – прессуемый пакет; 8 – уплотнительная резина; 9 – термопапа; 10 – стол; 11 – сильфон; 12 – шток пресса

Для обеспечения равномерного нагрева пакета между ним и огнеупорными плитами устанавливают более массивные по сравнению с пакетом молибденовые пластины, в результате чего основная часть магнитного потока, создаваемого индуктором, поглощается этими пластинами.



# Прессование в пресс-формах и между обогреваемыми плитами



С целью предотвращения схватывания КМ с молибденовыми пластинами на их поверхность предварительно наносят тонкий слой суспензии оксида алюминия в спирте. Прессование проводят в вакууме ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$  мм рт.ст.).

Схематически процесс прессования листов на прессе между обогреваемыми плитами показан на рисунке

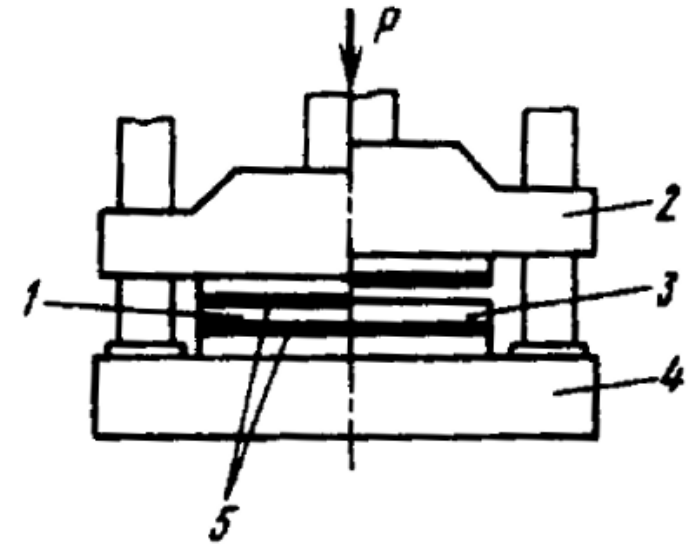


Схема изготовления листов из бороалюминия:  
1 – лист; 2 – верхняя траверса; 3 – пакет; 4 – нижняя траверса; 5 – обогреваемые плиты



## 2.2.2. Ступенчатое прессование



Разновидностью процесса прессования между обогреваемыми плитами пресса является ступенчатое прессование. Особенность этого процесса заключается в возможности получения полуфабрикатов в виде листов, полос, лент, профилей большой длины из КМ на прессах с небольшими размерами прессующих плит.

Прессование пакета из заготовок КМ большой длины осуществляется периодически:

- 1) вначале подпрессовывается участок, ближайший к одному из концов пакета;
- 2) затем пакет передвигается между плитами пресса таким образом, что непосредственно между плитами оказывается часть ранее пропрессованного участка и еще не подвергавшаяся прессованию часть.

Таким образом постепенно прорабатывается весь пакет.

При ступенчатом прессовании только ширина изделия определяется шириной прессующих плит, длина же его практически не ограничена. Схема процесса ступенчатого прессования показана на рисунке.

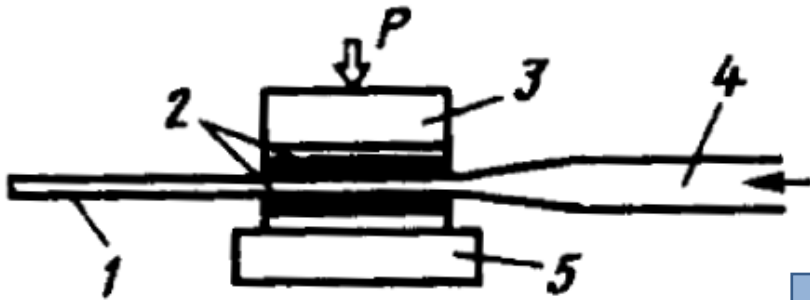


Схема ступенчатого прессования длинномерных полуфабрикатов (полос, профилей и т.п.) из бороалюминиевых композиций:

1 – полоса; 2 – обогреваемые плиты; 3 – верхняя траверса; 4 – пакет; 5 – нижняя траверса

Достоинством этого метода является перспективность получения этим методом листов из бороалюминиевых материалов шириной 1,2 м и длиной до 9 м очевидна.

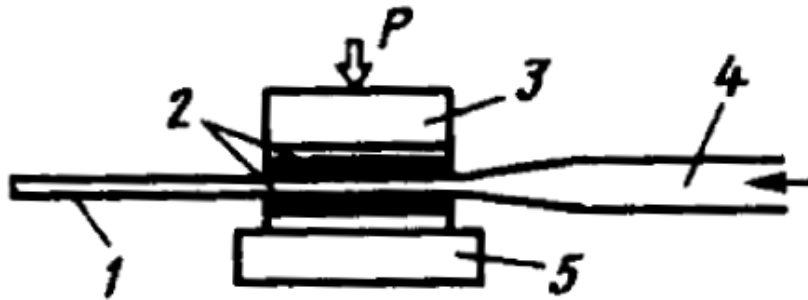


Схема ступенчатого прессования длиномерных полуфабрикатов (полос, профилей и т.п.) из бореалюминиевых композиций:

1 – полоса; 2 – обогреваемые плиты; 3 – верхняя траверса; 4 – пакет; 5 – нижняя траверса

Недостатком ступенчатого прессования является невысокая производительность процесса, обусловленная необходимостью выдержки каждого из прессуемых участков пакета при заданном давлении и температуре в течение промежутка времени, требующегося для пластической деформации и процессов диффузии.



## 2.2.3. Изостатическое, или автоклавное прессование



Процесс изостатического горячего прессования известен сравнительно недавно. Он сочетает в себе воздействие на тело температуры и давления газа. Обычно тело, на которое оказывается воздействие, помещают в вакуумированный герметичный контейнер, способный деформироваться при температуре процесса.

Установка для изостатического горячего прессования, как правило, состоит из трех основных агрегатов:

- сосуда высокого давления или автоклава,
- системы для создания давления;
- системы обеспечения температуры.

Сосуд высокого давления может быть выполнен либо в виде оболочки небольшой толщины, подкрепленной намотанной на нее проволокой, либо толстостенным, монолитным.



# Изостатическое, или автоклавное прессование



Применяемые в настоящее время в США в опытном производстве установки горячего изостатического прессования имеют диаметр рабочего пространства до 910 мм и рассчитаны на давление от 21 до 210 МПа. Наиболее часто применяют установки с давлением 70...105 МПа.

Экспериментальные установки горячего изостатического прессования могут работать под давлением до 1050 МПа. Давление в установках в зависимости от требуемой скорости нагружения обеспечивается компрессорами диафрагменного или поршневого типа

Высокие скорости создания давления достигаются в результате использования аккумуляторов высокого давления. В качестве рабочего газа обычно применяют гелий или аргон, однако существуют системы, в которых используют азот или воздух.



# Изостатическое, или автоклавное прессование



Установки изостатического горячего прессования обычно построены по принципу «холодных стенок», означая, что охлаждающая среда приложена либо снаружи, либо изнутри к стенкам сосуда высокого давления, уплотнениям и соединениям.

Наиболее сложная и ответственная часть установки – система обеспечения температуры прессования. Основой этой системы является печь, устанавливаемая внутри сосуда высокого давления таким образом, чтобы не было утечки теплоты за счет излучения и конвекции газов, находящихся под высоким давлением, к стенкам сосуда.

Конструкции установок изостатического прессования в течение последних 15-20 лет разрабатывали в двух основных направлениях.



# Изостатическое, или автоклавное прессование



Первое направление связано с усовершенствованием сосудов высокого давления. Были созданы автоматические быстрозакрывающиеся механизмы, позволяющие закладывать и извлекать обрабатываемые детали.

В конструкциях этих механизмов применяют затворы игольчатого типа и безрезьбовые затворы (закрепляемые обоймой), как в дополнение к обычным резьбовым гидравлическим затворам.



# Изостатическое, или автоклавное прессование



Схема выполнения профилей из металлокомпозитов

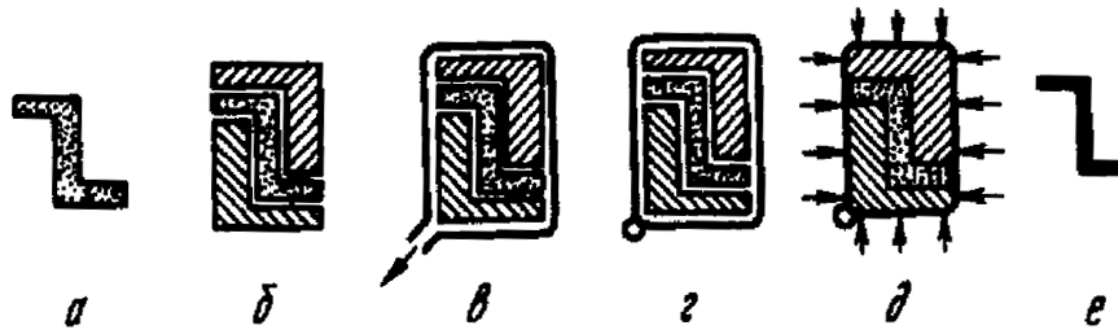
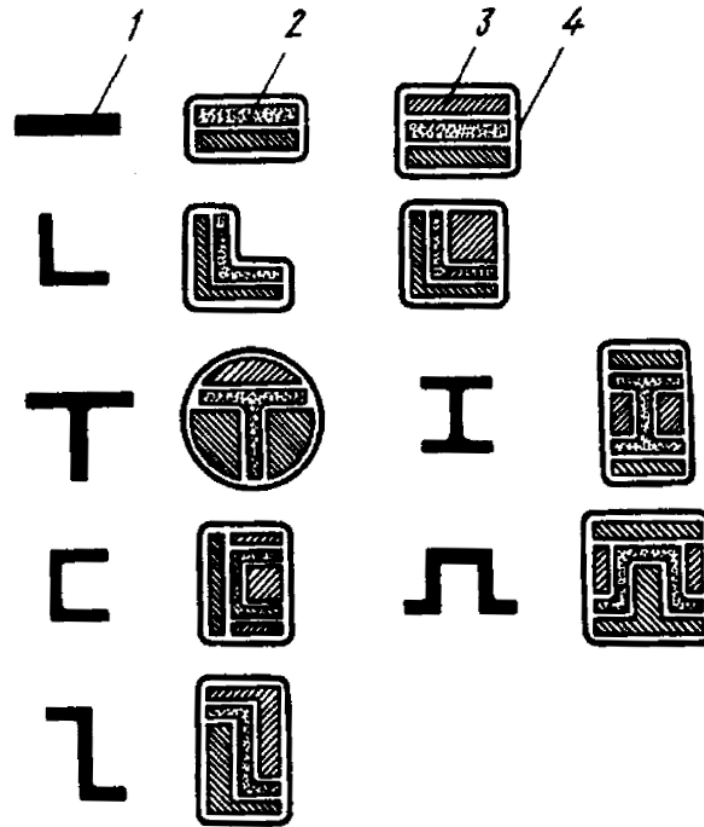


Схема изготовления профиля из КМ в изостате:

*a* – заготовка; *б* – сборка заготовки с формирующими элементами; *в* – заключение сборки в пластичный металлический контейнер и вакуумирование контейнера; *г* – заваривание контейнера; *д* – нагрев и подача давления; *е* – готовый профиль

Возможные виды полуфабрикатов и схемы приспособлений для их изготовления.



Возможные виды полуфабрикатов:  
1 – готовый полуфабрикат; 2 – заготовка; 3 – формирующий элемент; 4 – контейнер



## 2.2.4. Динамическое горячее прессование



Этот процесс, относящийся к категории импульсных методов формирования и называемый за рубежом процессом формования с применением высоких скоростей и энергий, применялся первоначально для прецизионнойковки металлических слитков в изделия сложной формы.

Изготовление композиционных материалов этим методом заключается в диффузионной сварке пакета предварительной заготовки, нагретого до необходимой температуры, в результате кратковременного приложения очень больших давлений.

Динамическое горячее прессование предварительных заготовок можно осуществлять на ковочных молотах и подобных им установках в специальных пресс-формах или вакуумированных пакетах. В отечественной практике этот метод применяется редко.



# Динамическое горячее прессование



Режимы изготовления и свойства бороалюминиевых композиций, полученных методом диффузионной сварки в изостате, представлены в таблице.

## Режимы изготовления и характеристики бороалюминиевых композиций

Матрица	Содержание волокна, % (об.)	Параметры изготовления			Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа
		Температура, °С	Давление, МПа	Время выдержки, мин		
Алюминиевый сплав:						
6061	48	490	35	60	1200	234
2024	30	500	48,5	60	580-830	179-190
Алюминий	50	580	30,0	2	1100	260



## 2.2.5. Сварка взрывом

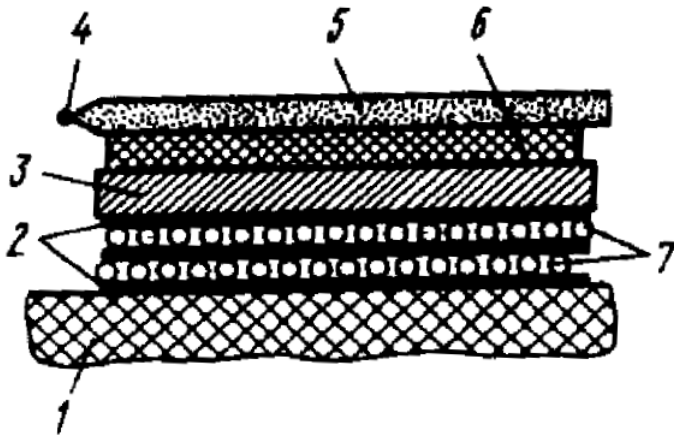


Отличительная особенность метода состоит в том, что компоненты материала не подвергаются или почти не подвергаются нагреву. Несмотря на то, что под действием ударной волны температура металла в условиях адиабатического сжатия может достигать высоких значений, время воздействия температуры составляет несколько микросекунд, поэтому эта мгновенная температура не оказывает существенного влияния на процессы взаимодействия, происходящие на границе раздела волокна с матрицей.

Более существенное значение для этих процессов имеет остаточная температура, т.е. температура непосредственно после разгрузки металла.

Взрывное прессование позволяет изготавливать изделия сложной формы, крупногабаритные полуфабрикаты, получить которые обычными методами сварки и обработки давлением либо практически невозможно, либо для этого следует использовать дорогостоящее, уникальное оборудование и оснастку.

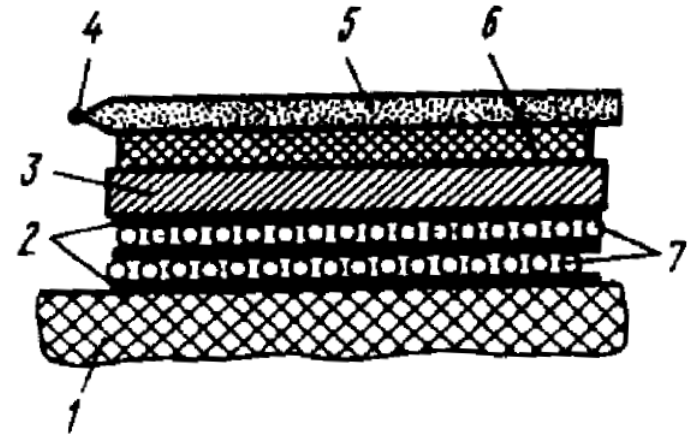
Принципиальная схема изготовления КМ сваркой взрывом показана на рисунке.



Принципиальная схема изготовления КМ сваркой взрывом:  
1 – основание; 2 – матричный материал (лист, фольга); 3 – метаемая плита; 4 – детонатор; 5 – слой взрывчатого вещества; 6 – буферный слой; 7 – армирующие волокна

Пакет, состоящий из чередующихся слоев матрицы и упрочняющих волокон, устанавливается на основание, сверху помещают метаемую пластину, затем слой взрывчатых веществ и детонатор. Под воздействием импульса высокого давления, развиваемого взрывчатом веществом, метаемая пластина разгоняется, передает импульс энергии свариваемым пластинам, которые и свариваются между собой и волокнами.

Основание, на котором проводят сварку взрывом, играет существенную роль. Материал основания подбирают таким, чтобы его плотность и акустическое сопротивление были такими же, как у композиционного материала, в противном случае возможно появление расслоений и разориентации волокон.



Принципиальная схема изготовления КМ сваркой взрывом:  
1 – основание; 2 – матричный материал (лист, фольга); 3 – метаемая плита; 4 – детонатор; 5 – слой взрывчатого вещества; 6 – буферный слой; 7 – армирующие волокна

Например, при изготовлении сваркой взрывом алюминиевого КМ, упрочненного вольфрамовой проволокой (средняя плотность –  $4,5 \text{ г/см}^3$ ), в качестве основания может служить титановая плита.



# Сварка взрывом



В случае получения КМ на песчаном фундаменте листы имеют коробление и шероховатую поверхность. При деформировании композиционного листа на таком основании вследствие значительного прогиба в материале появляются большие касательные напряжения, вызванные сдвигом металла матрицы, относительно волокон, которые обладают разными характеристиками пластичности.

Эти напряжения могут превышать прочность связи волокна с матрицей, что иногда приводит к образованию непроваров, снижающих прочность композиции. Кроме того, металлическая плита в качестве основания имеет и другие недостатки: отраженная волна, интенсивность которой составляет более 20 % от интенсивности падающей ударной волны, создает на границах раздела между слоями матрицы значительные растягивающие напряжения.



# Сварка взрывом



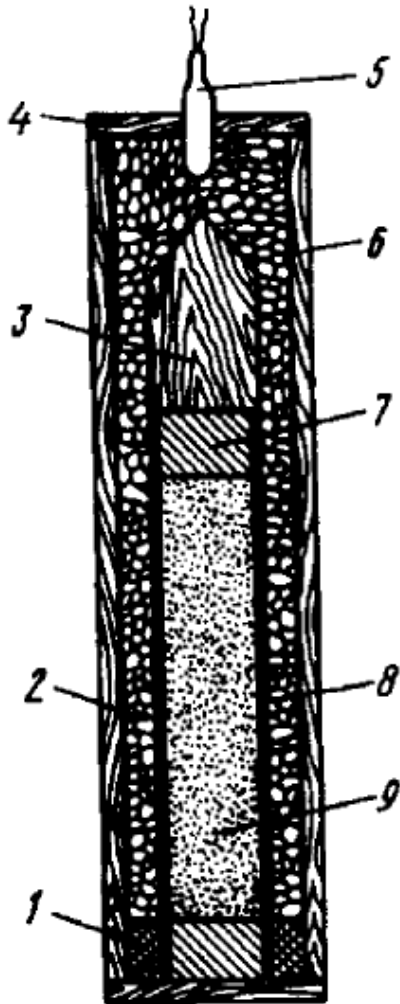
Это может приводить к образованию локальных дефектов, также снижающих прочность композиции. Более благоприятные условия сварки, обеспечивающие высокую прочность соединения, создаются при использовании в качестве основания плиты из материала, имеющего достаточно высокую жесткость в сочетании со сравнительно низким акустическим сопротивлением.

При сварке взрывом обычно используют взрывчатые вещества:

- тротил,
- аммониты,
- гексоген,
- смеси и сплавы этих веществ.

Качественные соединения при сварке взрывом листовых слоистых и слоистоволокнистых КМ получают при использовании малобризантных, порошкообразных взрывчатых веществ, например смеси тротила с аммиачной селитрой.

Схема взрывного прессования цилиндрических заготовок из порошкового вольфрамомолибденового КМ показана на рисунке.



Технологическая схема получения цилиндрических заготовок методом взрывного прессования:

1 – поливинилхлоридный диск; 2 – взрывчатое вещество; 3 – деревянный конус; 4 – картонная крышка; 5 – детонатор; 6 – картонная труба; 7 – стальная пробка; 8 – стальная трубка; 9 – прессуемая заготовка



# Сварка взрывом



Взрывчатые вещества характеризуются такими физико-химическими свойствами, как плотность, химическая и физическая стойкость, чувствительность к внешним воздействиям (удар, трение, нагрев и др.), бризантное действие, теплота взрыва, скорость детонации, температура взрыва. Бризантное действие взрывчатых веществ оценивают обычно по степени обжатия свинцовых цилиндров или по отклонению баллистического маятника и измеряют в миллиметрах.

Бризантное действие можно ослабить в случае необходимости путем введения между слоем взрывчатых веществ и метаемой пластиной прослойки из резины, пластика и других инертных материалов.



# Сварка взрывом



Процесс сварки металлов взрывом протекает в условиях, отличающихся от условий обычной сварки. Процесс импульсного нагружения характеризуется почти мгновенным возрастанием нагрузки до максимальных значений и обычным ее снижением. Возникающие при этом напряжения локализованы и вызывают локальную деформацию в микроучастках.

Соединение при сварке взрывом образуется в результате пластической деформации, обеспечивающей физический контакт разнородных материалов, локального перемешивания металлов в зоне соединения и тепловых процессов. Вследствие кратковременности процессов тепловыделения взаимная диффузия разнородных материалов в зоне соединения весьма незначительна либо отсутствует полностью.



# Сварка взрывом



Поверхности соединяемых листов и волокон, образующих композиционный материал, необходимо предварительно очистить от оксидных пленок и обезжирить. Методы очистки и подготовки поверхности различны в зависимости от природы материала, состояния поверхности (степени шероховатости, степени и характера загрязнения).

Известно, что прочностные характеристики КМ в значительной степени зависят от ориентации и регулярного расположения волокон. При использовании тонких волокон с большим отношением длины к диаметру имеется вероятность переплетения их, нарушения регулярного распределения их в заданном направлении.



# Сварка взрывом

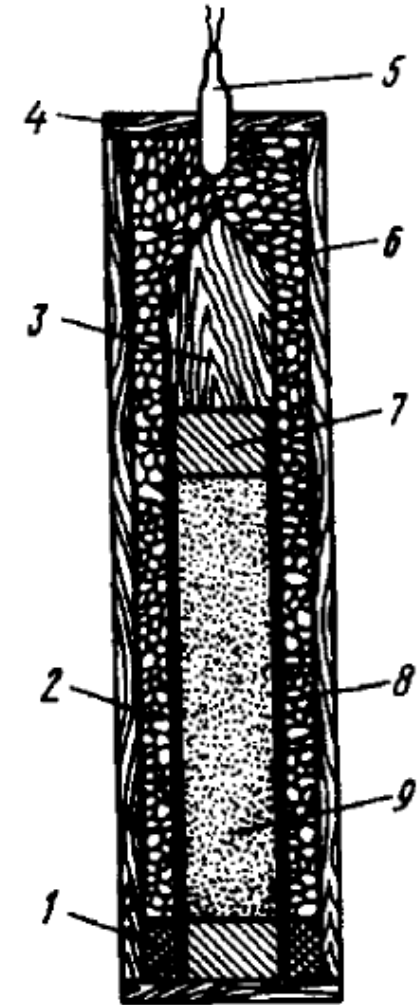


Для предотвращения этого явления используют различные способы фиксирования волокон, как правило, намотку волокон на листовую заготовку из материала матрицы, специальные рамки, на которые натягивают волокна. Наиболее удобны сетки или ленты, плетеные из металлической проволоки, равнопрочные или с очень редким утком, служащим лишь для крепления основы.

В зависимости от геометрических размеров образцов свариваемых компонентов, толщины листа, диаметра волокон, а также от их свойств, таких как пластичность, модуль упругости и чистота поверхности, число собираемых слоев для сварки взрывом может быть различным (от трех до нескольких десятков).

При изготовлении многослойного КМ условия для слоев, находящихся на разных уровнях, неодинаковые. Армирующая проволока в слоях, находящихся ближе к поверхности, сильнее внедряется в пластину, чем проволока внутренних слоев.

Отмечено, что повреждения во внешнем слое материала могут быть сведены к минимуму, если поверх собранного пакета под слоем взрывчатого вещества поместить защитный слой в виде резиновой или поливинилхлоридной пластины, слой жидкого стекла и других веществ.





# Сварка взрывом



Существенное влияние на прочность КМ оказывает характеристика заряда взрывчатых веществ. Для одного и того же состава взрывчатой смеси существует оптимальная высота заряда, обеспечивающая высокую прочность соединения и прочность композиции в целом.

Как правило, метод сварки взрывом используют для получения слоистых и слоисто-волокнистых КМ, содержащих либо разнородные металлические слои, либо пластичную матрицу, упрочняемую высокопрочной металлической проволокой.



### 3. Газофазные методы изготовления деталей из композитов



Принципиальная схема изготовления деталей из МКМ данными методами состоит в нанесении тем или иным способом на волокна слоя материала, заполняющего межволоконное пространство и составляющего собственно матрицу. В зависимости от способа нанесения может потребоваться дополнительная операция уплотнения материала прессованием или спеканием (например, при изготовлении композиций методом плазменного напыления).

Очень часто описываемые ниже способы используют для нанесения на упрочнители промежуточных слоев, либо выполняющих роль диффузионных барьеров, предотвращающих взаимодействие волокон с матрицей, либо улучшающих смачиваемость и прочность связи между матрицей и упрочнителем.



# Газофазные методы изготовления деталей из композитов



Методы нанесения покрытий целесообразно использовать для изготовления материалов с упрочнителями, не допускающими контакта с жидким металлом, например таких как:

- борные волокна – с алюминием,
- углеродные волокна - с никелевыми сплавами,
- большинство нитевидных кристаллов – с металлами.

Также методы нанесения покрытий целесообразно использовать для волокон, не подвергающихся пластической деформации:

- углеродные,
- борные волокна,
- волокна и нитевидные кристаллы тугоплавких соединений.



## 3.1. Газотермическое плазменное напыление



Плазменное напыление — это процесс получения покрытий заготовок, заключающийся в нагреве материала выше температуры плавления и распылении его с помощью газовой струи на подложку.

При высокотемпературном нагреве, осуществляемом тем или иным способом, напыляемое вещество плавится, а газовая струя распыляет расплавленный материал и направляет его с большой скоростью на поверхность изделия. При соударении расплавленных частиц с покрываемой поверхностью и между собой на поверхности образуется слой покрытия, толщина которого, а также плотность и прочность сцепления с основой определяются технологическим режимом процесса напыления и природой материалов покрытия и основы.



# Газотермическое плазменное напыление



Важная особенность нанесения покрытий газотермическим напылением заключается в том, что покрытия можно наносить без существенного повышения температуры изделия и других процессов физико-химического взаимодействия покрытия с покрываемой поверхностью.

Прочность сцепления покрытия с основой определяется тремя видами связи:

- 1) механическим сцеплением частиц металла (в случае металлизации) с шероховатой поверхностью,
- 2) силами адгезии и химическим взаимодействием,
- 3) микросваркой в очень тонком поверхностном слое основы.



# Газотермическое плазменное напыление



Весь процесс можно подразделить на три непрерывные основные стадии:

- 1) распыление исходного материала;
- 2) образование направленного потока распыляемых частиц;
- 3) образование слоя напыленного материала в результате кристаллизации распыляемых частиц на подложке.

Схема плазменного напыления показана на рисунке далее.

В плазменном распылителе, состоящем из водоохлаждаемых катодного (вольфрамовый катод) и анодного (медное сопло) узлов, с помощью источника постоянного тока возбуждается электрическая дуга, которая стабилизируется стенками канала сопла и плазмообразующим газом, поступающим от системы газоснабжения.

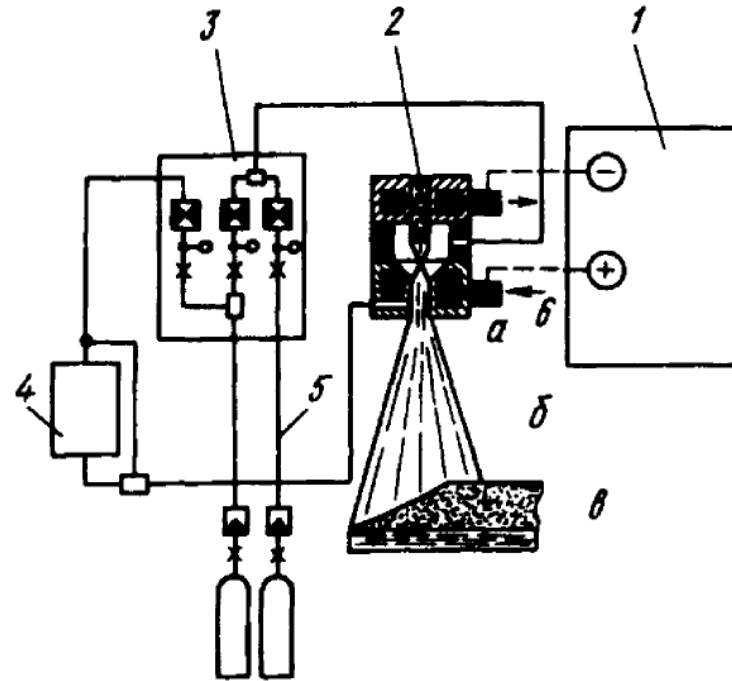


Схема плазменного напыления:

*a* – расплавление исходного материала; *б* – формирование направленного потока распыляемых частиц; *в* – формирование слоя напыленного материала; *1* – источник питания; *2* – плазменный распылитель; *3* – пульт управления; *4* – система подачи распыляемого материала; *5* – система газоснабжения; *6* – система водоснабжения

Управление расходом рабочего газа и мощностью дуги осуществляется с помощью пульта управления.

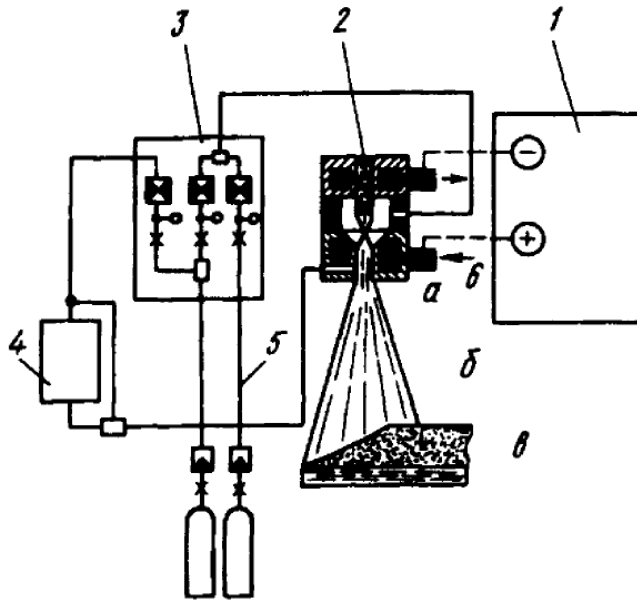


Схема плазменного напыления:

*a* – расплавление исходного материала; *б* – формирование направленного потока распыляемых частиц; *в* – формирование слоя напыленного материала; 1 – источник питания; 2 – плазменный распылитель; 3 – пульт управления; 4 – система подачи распыляемого материала; 5 – система газоснабжения; *б* – система водоснабжения

В высокотемпературную плазменную струю, истекающую из сопла распылителя, подается распыляемый материал в виде порошка, стержня или проволоки, в соответствии с чем и различаются виды напыления.

Причем в случае напыления проволокой последняя может служить анодом, замыкая на себе дугу, при этом существенно увеличиваются производительность и коэффициент осаждения материала.



# Газотермическое плазменное напыление



В качестве плазмообразующих газов применяют:

- азот,
- аргон,
- гелий,
- водород,
- смеси этих газов.

Нейтральные газы способствуют предотвращению окисления напыляемых материалов. Плазменное напыление порошковыми материалами, на транспортировку которых расходуется около 10 % газа, предпочтительнее, так как позволяет в более широких пределах варьировать свойства образующихся покрытий за счет динамических характеристик процесса и использовать механические смеси порошков различного состава.

## Принципиальные схемы устройства головок плазменных горелок

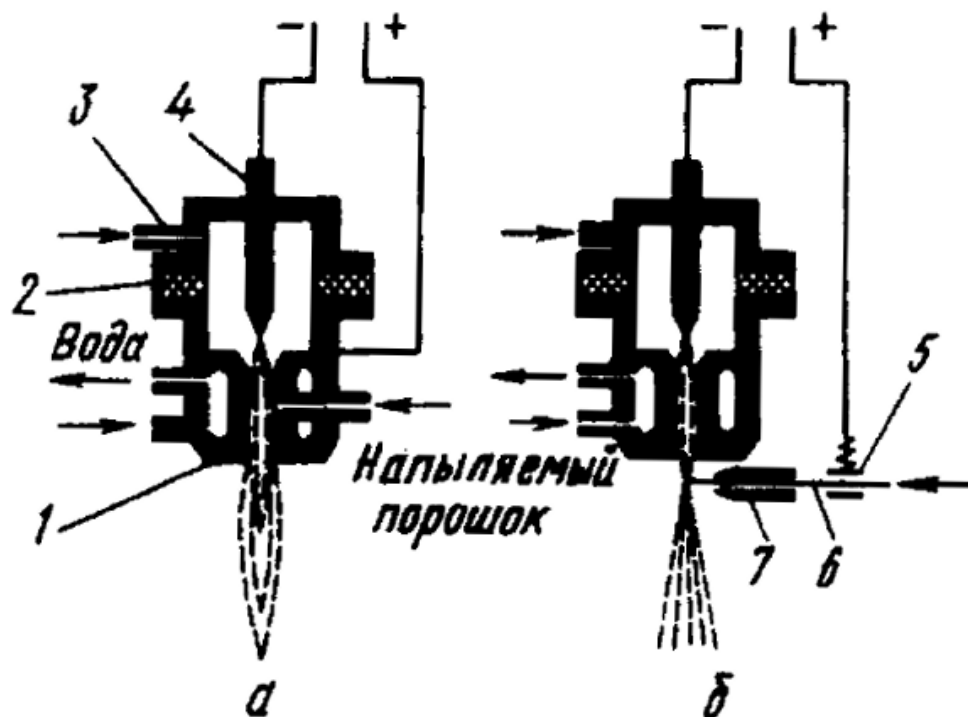
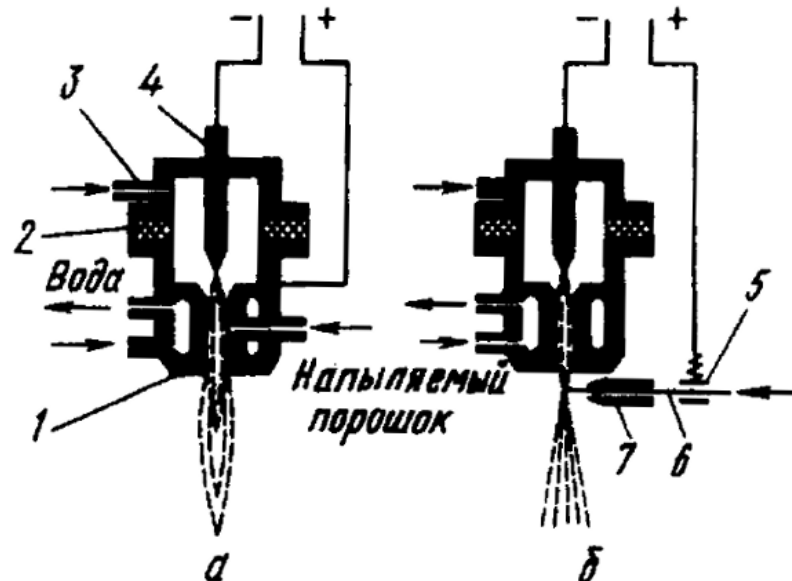


Схема устройства головок плазменных горелок для нанесения покрытий из порошков (а) и проволоки (б):

1 – медное сопло; 2 – изолирующее кольцо; 3 – ввод плазмообразующего газа; 4 – вольфрамовый электрод (катод); 5 – прижимной контакт; 6 – проволока из напыляемого металла (анод); 7 – направляющая труба

В головке, представленной на рисунке «а», напыляемый порошок вводится в дуговую плазму, образуемую между вольфрамовым электродом (катодом) и соплом (анодом).

В головке, представленной на рисунке «б», сопло остается электрически нейтральным, а дуговой разряд возникает между вольфрамовым электродом горелки и напыляемой проволокой, которая является расходуемым анодом.





# Газотермическое плазменное напыление



В отечественной практике обычно используют серийно выпускаемые аппараты УПУ-3М (напыление из проволоки и порошка) и УМП-5 (напыление из порошка).

Принципиальная технологическая схема изготовления волокнистых КМ с использованием метода плазменного напыления матрицы состоит из следующих операций:

- 1) укладки волокон, например, на металлическую фольгу;
- 2) плазменного напыления тонкого слоя материала, служащего матрицей;
- 3) резки монослойного (или многослойного) полуфабриката и укладки в форму для прессования;
- 4) диффузионной сварки под давлением, приводящей к образованию плотного материала.



# Газотермическое плазменное напыление



В процессе плазменного напыления очень важно обеспечить достаточно хорошую связь между напыленным слоем и волокнами, а также между напыленным слоем и фольгой. Хорошая связь между этими тремя составляющими КМ значительно облегчает операции раскрытия и укладки, предотвращает отрыв и поломку волокон.

Прочность связи покрытия с волокнами и фольгой, так же как и качество покрытия, его пористость, содержание примесей, определяют следующие основные технологические параметры:

- состояние поверхности волокон и фольги (чистота, шероховатость);
- рабочая среда (воздух, аргон, водород, азот);
- температура напыляемой поверхности (подложки);
- расстояние от дуги до напыляемой поверхности;
- напряжение и плотность тока дуги;
- расход плазмообразующего газа;
- скорость подачи напыляемого материала (порошка и проволоки);
- размер частиц напыляемого порошка;
- скорость перемещения факела относительно напыляемой поверхности.



# Газотермическое плазменное напыление



При напылении на поверхность алюминиевой или титановой фольги последнюю подвергают обезжириванию и осветляющей химической обработке для полного или частичного растворения слоя оксидов, неизменно присутствующих на поверхности фольги.

В некоторых случаях для лучшего растворения оксидной пленки целесообразно предварительно подвергнуть поверхность фольги пескоструйной обработке или механической чистке металлической щеткой; такая обработка приводит к механическому разрушению оксидной пленки и облегчает процесс химического растворения ее.



# Газотермическое плазменное напыление



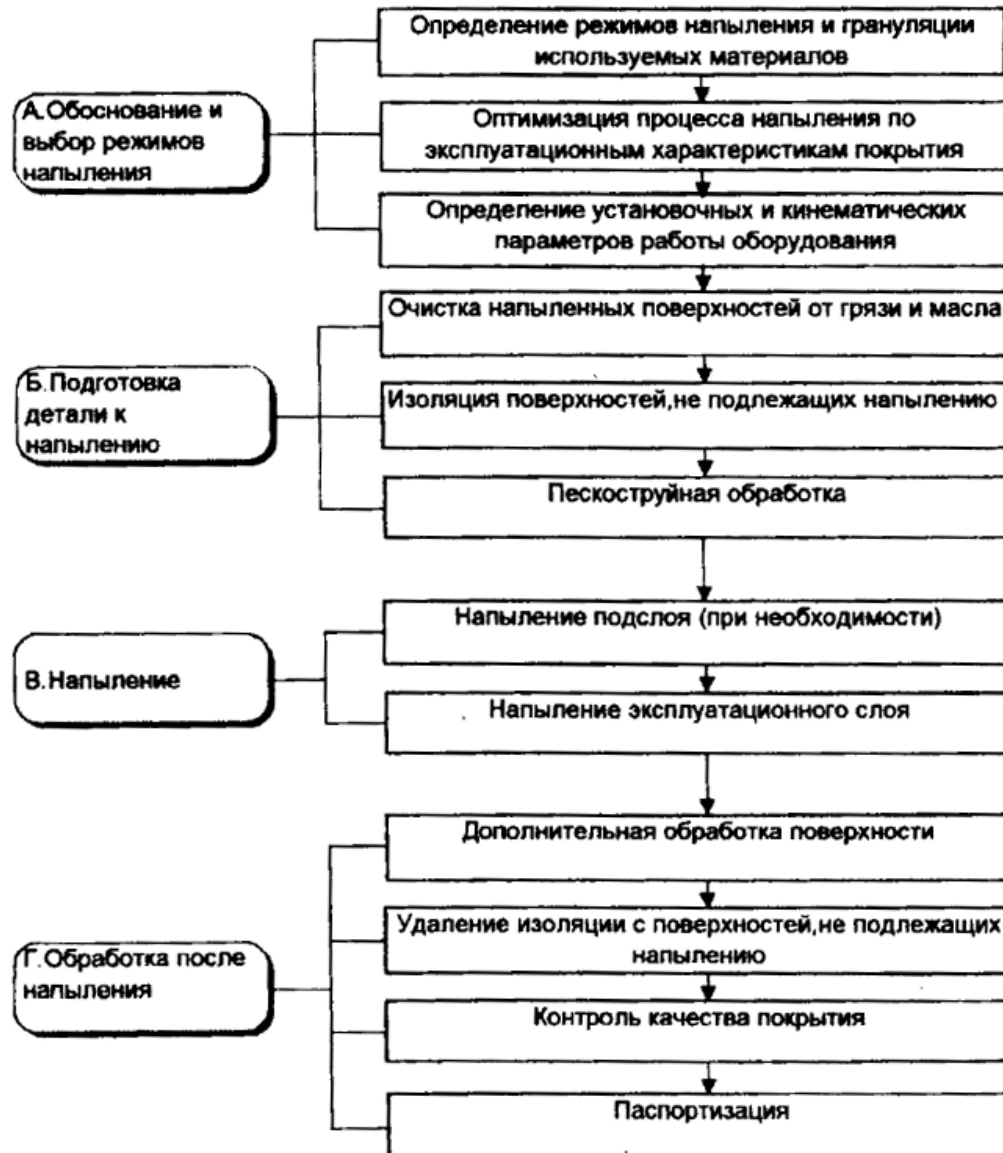
Следует отметить, что удаление оксидной пленки с поверхности фольги не только повышает прочность связи ее с напыляемым слоем, но и значительно облегчает последующий процесс диффузионной сварки.

Оксидную пленку следует удалять перед напылением, так как длительное хранение очищенной фольги приводит к образованию нового оксидного слоя.

Технологический процесс плазменного напыления позволяет изготавливать изделия, состоящие из одного или нескольких напыленных материалов и сплавов.



# Газотермическое плазменное напыление. Схема построения технологического процесса





# Газотермическое плазменное напыление



Таким образом, технологический процесс плазменного напыления позволяет не только наносить различные покрытия, но и изготавливать изделия, состоящие из одного или нескольких напыленных материалов и сплавов.

При этом напыление осуществляют на специально изготовленные формы или модели, называемые оправками, которые придают напыляемым материалам заданную конфигурацию и размеры. После напыления изделие извлекают из формы или снимают с оправки (либо последнюю уничтожают). Учитывая специфические особенности и свойства напыленных материалов, изделия можно конструктивно упрочнить цельнометаллическим каркасом, арматурой и др.



## 3.2. Осаждение из газовой фазы



В последние годы все большее распространение в различных областях современной техники получил метод осаждения металлических и неметаллических материалов из газовой фазы, сопровождающийся химической реакцией.

Несмотря на то, что метод был известен еще в конце XIX столетия, лишь недавно его начали применять для получения защитных покрытий и формообразования изделий из МКМ.

Общим для всех разновидностей метода является то, что к нагретой поверхности поступают пары легколетучего соединения металла и в результате химической реакции на покрываемой поверхности образуется покрытие заданного состава. Остальные продукты реакции находятся в газообразном состоянии и удаляются из реакционной системы.



# Осаждение из газовой фазы



В зависимости от рабочего давления в системе различают:

- 1) установки для осаждения материалов при атмосферном давлении;
- 2) установки для осаждения материалов при пониженном давлении.

Установки первого типа несколько проще как в аппаратном оформлении, так и в эксплуатации, в частности для них не так важно требование полной герметичности. К их преимуществам следует отнести возможность достижения больших скоростей осаждения металла, что обеспечивает высокую производительность процесса.

Преимуществом установок, работающих при пониженном давлении, является качество получаемых металлов с достаточно высоким сцеплением с подложкой.



# Осаждение из газовой фазы



Установки для осаждения металлов из газовой фазы при атмосферном давлении в системе состоят обычно из:

- 1) реакционной камеры, где происходит осаждение металла в результате протекания реакции на горячей поверхности,
- 2) устройства для нагрева подложки и регистрации ее температуры,
- 3) системы очистки газоносителя,
- 4) измерителей скорости потока - расходомеров (водорода, гелия, аргона),
- 5) испарителей металлосодержащего соединения и приборов для измерения упругости паров в реакционной камере.

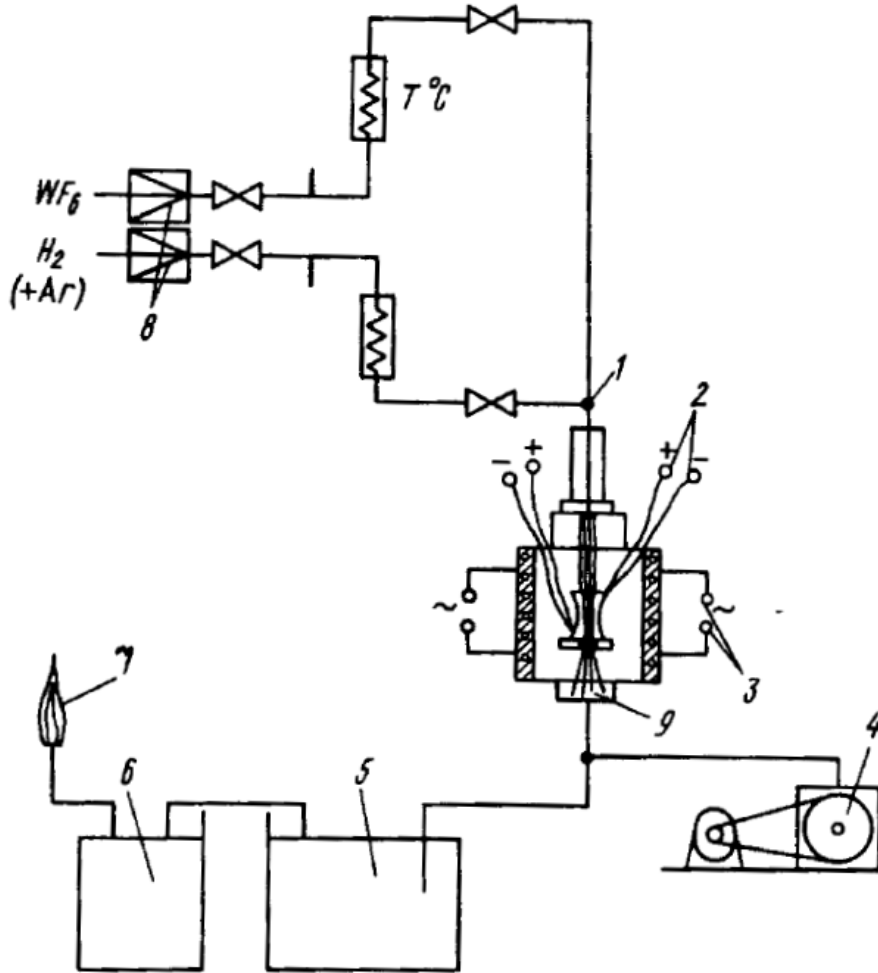


Схема процесса осаждения из газовой фазы:

- 1 – смеситель реакционной камеры; 2 – нагреватели подложки;  
 3 – нагреватели камеры; 4 – вакуумный насос; 5 – осадительная печь; 6 – емкость-поглотитель; 7 – факел продуктов сгорания;  
 8 – фильтры исходных продуктов; 9 – реакционная камера

Реакционная камера (реактор) представляет собой один из основных узлов установок для газофазного осаждения. Для изготовления камеры используют специальные материалы, не существенно взаимодействующие с газовыми средами, как правило, стекло, медь, нержавеющую сталь. Преимуществом стеклянных установок является возможность визуального наблюдения процессов.



# Осаждение из газовой фазы



Для предотвращения опасности конденсации паров металлосодержащих соединений на холодных частях реакционных камер, часто предусматривают термостатирование стенок реактора, которое позволяет поддерживать заданную температуру (180...200 °С) в течение всего эксперимента. Для электрической и тепловой изоляции используют асбест, асбоцемент, оксиды алюминия, пенопласт.

Вакуумные уплотнения изготавливают из тефлона, меди, алюминия. Установки имеют откалиброванные диафрагмы для регулирования скорости откачки газов.



# Осаждение из газовой фазы



Равнотолщинность слоя осаждаемого металла по длине изделия обеспечивается оптимальной скоростью потока парогазовой смеси. Кроме того, на толщину покрытия и эффективность процесса существенно влияют способ нагрева детали, а также его геометрическое расположение в камере.

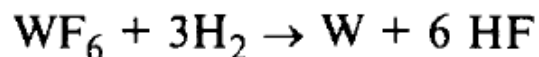
В процессах осаждения из газовой фазы применяют в основном три способа нагрева: индукционный, прямым пропусканием тока и с помощью инфракрасного излучения. При этом очень важно обеспечить равномерный нагрев детали и предотвратить появление значительных перепадов температуры.



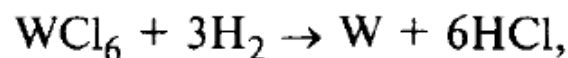
# Осаждение из газовой фазы



В реакторе происходит термодинамическая реакция



или



при этом оптимальная температура осаждения покрытия составляет 500...700 °С и 800...1100 °С соответственно.

Максимальная скорость осаждения вольфрама W из гексафторида вольфрама  $\text{WF}_6$  получена при температуре 550 °С и парциальном давлении 0,1 атм и составляет 6 мкм/мин.

Гексафторид вольфрама  $\text{WF}_6$  представляет собой белый порошок. При температуре 17 °С этот порошок превращается в жидкость, а при дальнейшем повышении он начинает испаряться.

Водород  $\text{H}_2$  и гексафторид вольфрама  $\text{WF}_6$  нагревают отдельно до температуры порядка 170 °С и смешивают только перед подачей в реакционную камеру.



# Осаждение из газовой фазы



Водород проходит систему фильтров, освобождаясь от примесей воды. Фильтрами служат емкости с гранулированной медью или палладиевые сушители. Через реакционную камеру чаще всего эта смесь проходит прямоходом со скоростью потока от 0,3 до 2 м/с.

При этом вначале температура подложки должна быть несколько выше температуры газа, а затем она снижается, но не ниже температуры газа. В случае равенства температур или, что еще хуже, если температура газа будет выше температуры подложки, произойдет интенсивное осаждение вольфрама или выпадение порошка в реакционную камеру. Вакуумные насосы для откачки газа из камеры применять сложно ввиду присутствия фтора F в газе.



# Осаждение из газовой фазы



После прохождения реакционной камеры газы попадают в печь с температурой 1000 °С, где  $WF_6$  выпадает в осадок в виде порошка, а непрореагировавшие продукты, в том числе фторид HF, поступают в см кость-поглотитель, которая представляет собой цилиндр с размещенными в нем полочками, расположенными лабиринтом. На этих полочках насыпан карбонат кальция  $CaCO_3$ , который, реагируя с HF, образует плавиковый шпат  $CaF_2$  (минерал) и углекислый газ  $CO_2$ .

Плавиковый шпат – вещество безвредное и даже полезное. В промышленном производстве можно было бы использовать и плавиковую кислоту HF, но в условиях опытного производства это достаточно сложно и дорого.



# Осаждение из газовой фазы



Вместо печи, с температурой  $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  для осаждения  $\text{WF}_6$  можно использовать ловушки с жидким азотом  $\text{N}_2$ , в которых при температуре  $t = -87 \text{ }^\circ\text{C}$   $\text{WF}_6$  выпадает в виде кристаллов. В процессе осаждения те места, на которые не должен осаждаться металл, закрывают графитовыми кольцами с особой геометрией (с острыми углами). После окончания процесса осаждения поверхность трубы обтягивается до нужной толщины, при этом графитовое кольцо срезается также механическим путем.

Выходящая из реактора смесь продуктов разложения, обычно содержащая соляную и плавиковую кислоты, является очень агрессивной и токсичной. Утечка этих веществ в атмосферу не допустима, а проникновение смеси в вакуумные насосы резко снижает продолжительность работы насосов.



# Осаждение из газовой фазы



Обычно с целью предотвращения нежелательных явлений используют щелочные ловушки, противоточные водяные газоуловители с системой снижения излишка водорода на выходе.

Процессы осаждения из газовой фазы имеют большое число параметров, оказывающих влияние на характеристики получаемых покрытий:

- температура подложки,
- температура испарения металлосодержащего соединения,
- скорость газового потока, общее давление в реакционной камере,
- скорость откачки.

Измерение высокой температуры (свыше 1000 °С) целесообразно проводить пирометрами через специальные окна из молибденового стекла. В области средней температуры (до 1000 °С) измерения осуществляют с помощью термопар. Для измерения скорости газовых потоков используют реометры. Общее давление в камере измеряют с помощью манометров, мановакуумметров и вакуумметров.



# Осаждение из газовой фазы



Осаждение из газовой фазы широко применяют для различных целей - для защиты сопел, камер сгорания ЖРД (диаметром до 50 см), тиглей, блоков и сердечников, лопаток турбин, микротермопар, трубопроводов насосов, деталей реакторов и т.д.

Кроме того, этот способ позволяет получать тугоплавкие материалы и сплавы с плотностью, близкой к теоретической, а также изделия сложной формы из этих материалов, например молибденовые и вольфрамовые трубы, носовые конуса ракет и др.



# Осаждение из газовой фазы



Методом осаждения из газовой фазы можно изготавливать материалы с уникальными свойствами, например пиролитический графит, т.е. материалы, получаемые термическим разложением углеводородов.

В зависимости от условий осаждения можно регулировать анизотропию свойств осажденного слоя. Например, носовые конуса ракет, полученные таким способом, обладают термической проводимостью вдоль поверхности, почти в 100 раз превышающей проводимость в перпендикулярном направлении.

Известно, что осаждением из газовой фазы получен алюминий чистотой 99,999 %.



# Осаждение из газовой фазы

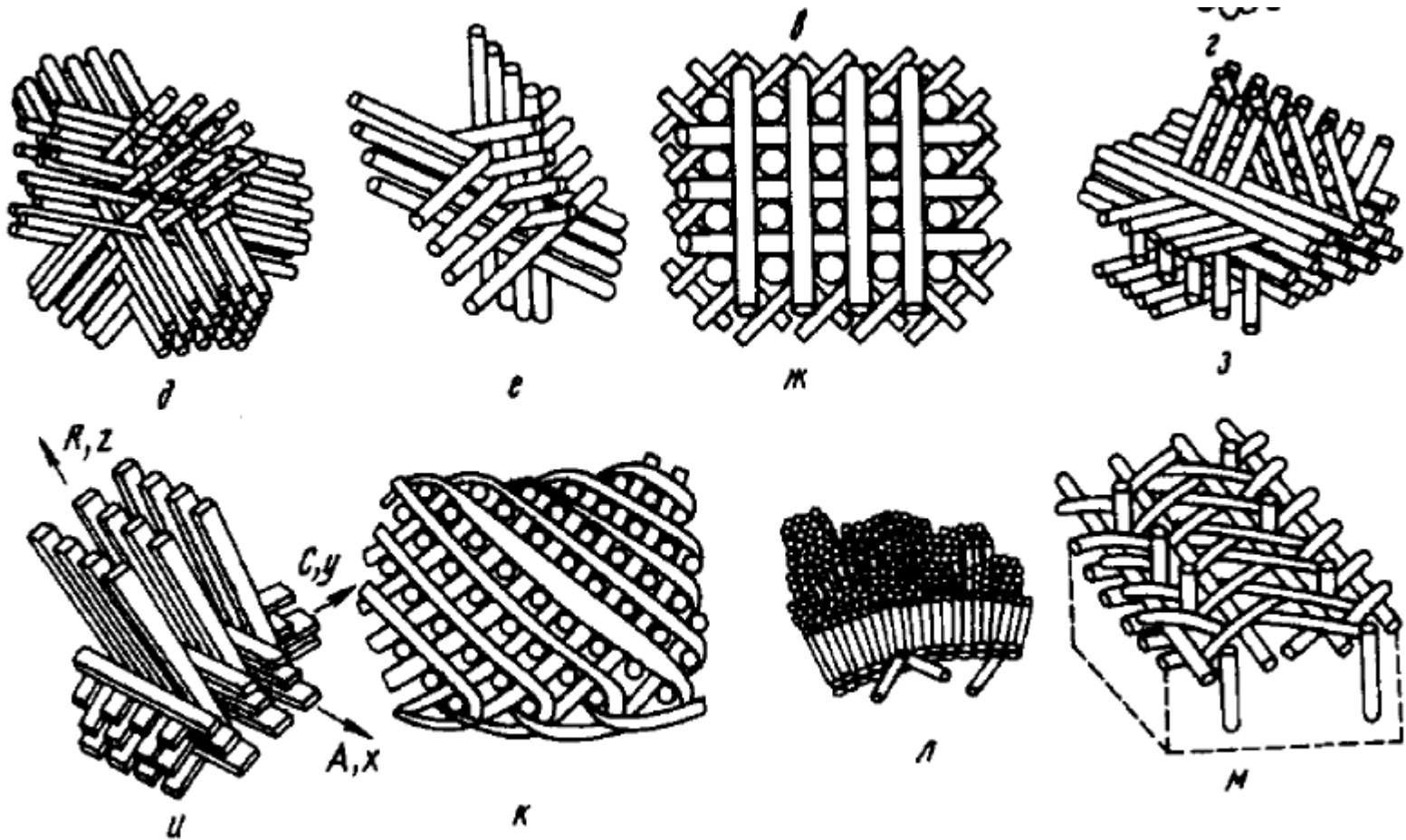


Качественно новым направлением является создание КМ из несплавляемых компонентов. Кристаллизацией из газовой фазы получены монокристалльные усы из оксида алюминия, карбида кремния, большинства металлов, графита и других материалов.

Упрочнение тугоплавкими волокнами значительно улучшает физические характеристики жаростойких конструкционных материалов.

Так, нитевидные кристаллы графита, корунда, железа имеют при комнатной температуре предел прочности, равный 20000, 15000 и 13000 МПа соответственно (прочность массивных образцов из этих материалов равна 0,3 и 3 МПа соответственно). Этим возможности метода не ограничиваются.

## 4.1 Изготовление пространственных армирующих структур





## 4.1.1. Углерод-углеродные композиционные материалы

Углерод-углеродные композиционные материалы представляют собой углеродосодержащую или графитовую матрицу, армированную углеродным либо графитовым волокном. Эти матрицы обладают как свойствами монолитного графита, так и свойствами волокнистых КМ.

Основные преимущества УУКМ состоят в высокой теплостойкости, малой плотности, стойкости к тепловому удару и облучению. Эти материалы обладают высокими прочностными и жесткостными характеристиками при обычной и повышенной температурах, низким КЛТР и рядом других ценных свойств.

УУКМ длительно работоспособны при температурах до 773 К в окислительной среде и до 3273 К - в инертной среде и вакууме. При этом их прочность с ростом температуры повышается в 1,5 — 2 раза.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



Тем не менее применение графитов ограничено их прочностными свойствами и, прежде всего, термопрочностью, т.е. способностью материала сопротивляться температурным напряжениям, обусловленным неравномерным прогревом конструкции.

Современные конструкции могут подвергаться значительным перепадам температур, достигающим 1000 К/см. В этих случаях оказываются вне конкуренции УУКМ. От графитов ими унаследована углеродная матрица, обладающая высокой термостойкостью, при этом армирующий каркас из углеродных волокон позволяет в несколько раз увеличить прочность композита по сравнению с графитами. Причем углеродные волокна в этих материалах действуют не только как подкрепляющий набор, но и как механизм, препятствующий распространению трещин.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



История применения УУКМ насчитывает около десяти лет. За это время разработан широкий спектр этих материалов, которые предназначались, в основном, для эрозионной защиты конструкций ракетно-космической техники. Современные УУКМ, обладающие высокой термостойкостью и высокими механическими характеристиками (прочность на растяжение материала в зависимости от структуры армирования изменяется от 100 до 1000 МПа), открывают возможность для совершенствования характеристик и создания качественно новых направлений в самых разных областях.

В качестве армирующего материала наибольшее применение нашли углеграфитовые волокна, нити, жгуты и пряжа. Типовым материалом для матриц служат смолы (фенольные, фурановые, эпоксидные и др.) и каменноугольный пек - продукт крекинга угля.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



В настоящее время УУКМ получают в основном тремя способами:

- 1) пропиткой смолой волокнистого каркаса и карбонизацией;
- 2) осаждением углерода из газовой фазы между волокнами каркаса;
- 3) сочетанием пропитки смолой и карбонизации с осаждением углерода из газовой фазы.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



Основными этапами при первом способе технологического процесса получения УУКМ являются:

- 1) формование исходной заготовки методами намотки или выкладки из углепластика,
- 2) полимеризация связующего,
- 3) карбонизация,
- 4) уплотнение пиролитическим углеродом,
- 5) окончательная термическая обработка,
- 6) нанесение противоокислительных покрытий на основе карбидов кремния, иридия, циркония.

Полимеризация связующего осуществляется при температуре не более 473 К. При последующем пиролизе связующего происходит образование науглероженной фазы (кокса).



# Углерод-углеродные композиционные материалы



Чем больше содержание твердых продуктов пиролиза, прочность кокса и выше его сцепление с волокнами, тем выше качество получаемого УУКМ.

При конечной температуре пиролиза, не превышающей 1073... 1773 К, образуется карбонизированный материал. В случае нагрева карбонизированного материала до 2773...3273 К происходит его графитизация. Процесс пиролиза органических матриц очень продолжителен и составляет примерно 75 ч.

Для получения плотного материала с хорошими механическими свойствами осуществляют многократно цикл пропитка—отверждение—карбонизация.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



Плотность УУКМ в зависимости от режимов его получения находится в интервале от 1300 до 2000 кг/м<sup>3</sup>.

Свойства УУКМ изменяются в широком диапазоне, так как они определяются многими факторами: свойствами исходного волокна и природы связующего, степенью наполнения, свойствами кокса и прочностью его связи с волокном, условиями пропитки, отверждения, карбонизации, графитизации, числом циклов пропитка—карбонизация.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



Второй способ изготовления УУКМ состоит в получении заготовки из:

- сухого волокна методами укладки,
- намотки,
- плетения,
- армированием ткани в третьем направлении короткими волокнами,
- прошивкой.

В настоящее время интенсивно разрабатываются УУКМ, армированные в трех и более направлениях. Углеродные волокна собирают с помощью специальных приспособлений в соответствии со схемой ориентации волокон в блоке. Получаемые таким образом пространственно армированные УУКМ характеризуются относительной изотропностью, низким коэффициентом термического расширения и позволяют изготавливать заготовки для деталей больших размеров.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



При получении матрицы методом химического осаждения из газовой фазы применяют природный газ метан или аналогичный газообразный углеводород в комбинации с водородом или аргоном.

Этот способ перспективен, поскольку позволяет создавать материалы любой архитектуры с любыми наперед заданными свойствами при этом даже послойно.

Например, можно осаждать таким образом не только углерод, но и такие материалы, как цирконий, медь, тантал и другие, осаждать послойно, придавая КМ различные желаемые свойства.

Таким образом, полученный УУКМ в виде блока с определенной плотностью, жесткостью и подобными характеристиками, является полуфабрикатом, который может быть переработан в деталь методами механической обработки.



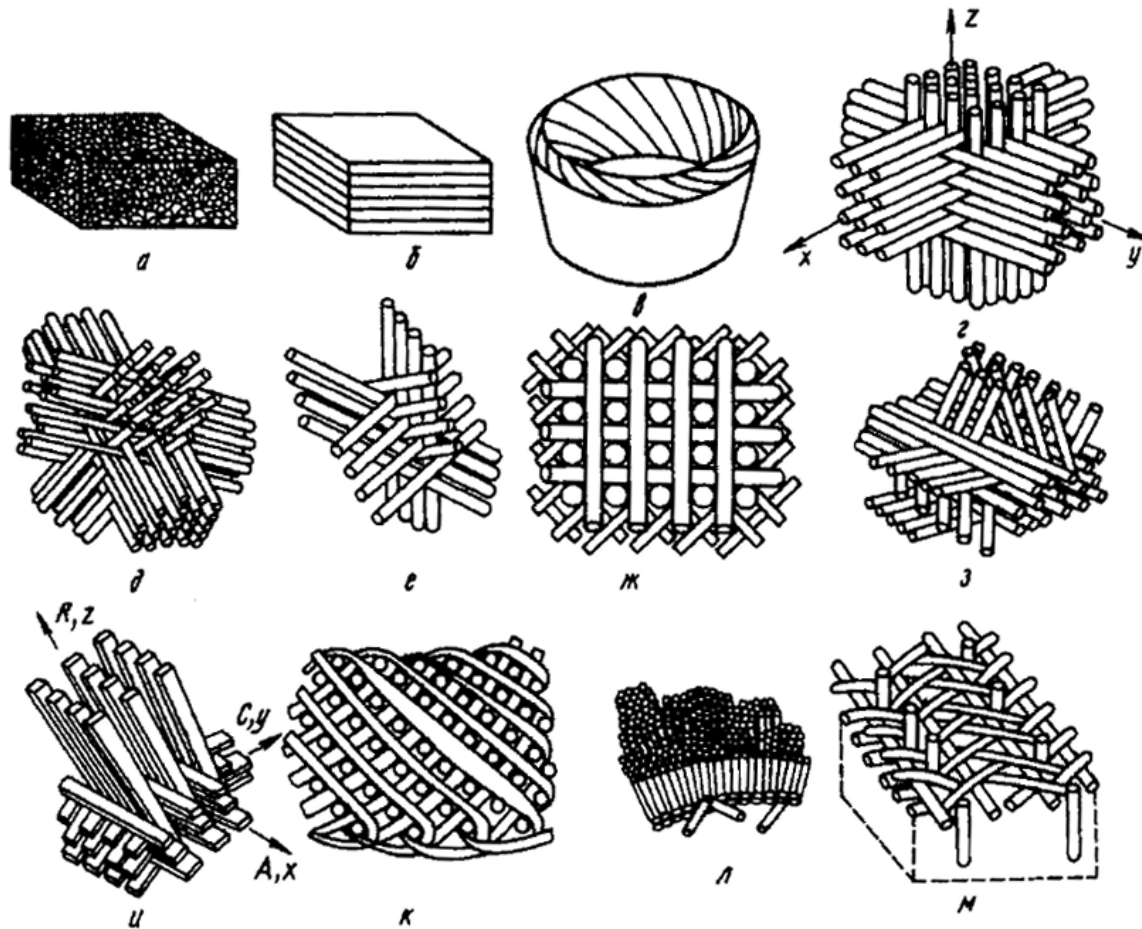
# Углерод-углеродные композиционные материалы



В общем случае УУКМ, полученные вторым способом, имеют большую плотность, более высокое содержание углерода, лучшие характеристики сцепления волокна с матрицей, но и большую стоимость, чем УУКМ, полученные пропиткой.

Структуры УУКМ обычно классифицируют по геометрическому принципу.

Наиболее перспективным видом армирования УУКМ конструкционного назначения является многонаправленное армирование.



### Структура УУКМ:

*a* – хаотичная; *b* – слоистая; *в* – розеточная; *г* – ортогональная 3D; *д* – 4D; *e* – 4D-Л; *ж* – 5D-Л; *з* – 5D; *и* – аксиально-радиально-окружная; *к* – аксиально-спиральная; *л* – радиально-спиральная; *м* – аксиально-радиально-спиральная



# Углерод-углеродные композиционные материалы

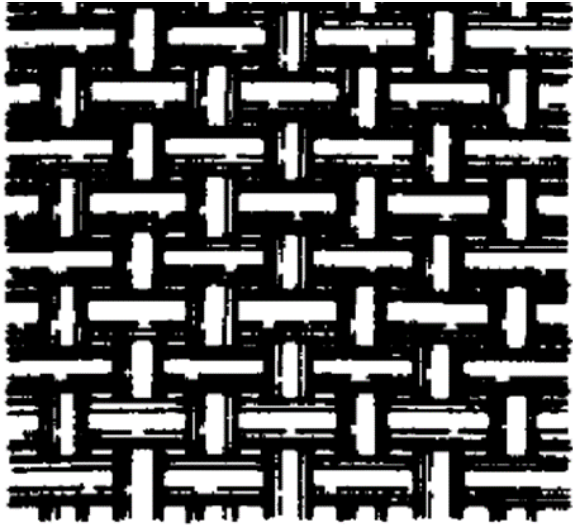


Многонаправленные УУКМ дают возможность реализовать заданные свойства материала в разных направлениях у готового изделия. В зависимости от выбранного типа волокон или их сочетания свойства УУКМ можно менять в широких пределах. Волокна с наиболее высоким модулем упругости обеспечивают самые высокие теплопроводность, плотность, содержание углерода и наиболее низкое термическое расширение композита.

Такое сочетание свойств обусловлено высокой температурой при изготовлении высокомодульных волокон. Выбор самого подходящего типа волокна в каждом конкретном случае применения следует рассматривать как самостоятельную задачу проектирования.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



Однослой-  
ная трехнаправленная  
(3D) ткань

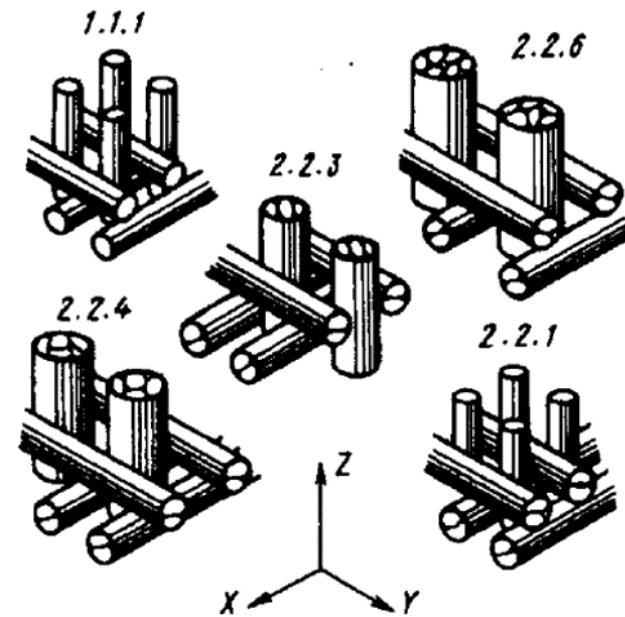
Подходящим для армирования композитов материалом из переплетенных нитей является двунаправленная (2D) ткань. Ткани характеризуются шагом нитей, размером пучка, процентным содержанием нитей в каждом направлении, эффективностью упаковки нитей и сложностью узора плетения. Если необходима схема армирования с третьим направлением нитей, можно создать трехнаправленные (3D) ткани.



# Углерод-углеродные композиционные материалы



Идеальной структурой обладают конструкционные композиционные материалы, в которых заданный тип и количество армирующих волокон в объеме изделия расположены так, что элемент конструкции из этого материала выдерживает расчетные нагрузки. Технология многонаправленного ткачества и является способом производства композитов с регулируемыми свойствами.



Схемы ортогонального трехнаправленного (3D) переплетения

Простая многонаправленная структура из трех взаимно перпендикулярных нитей (3D) показана на рисунке.

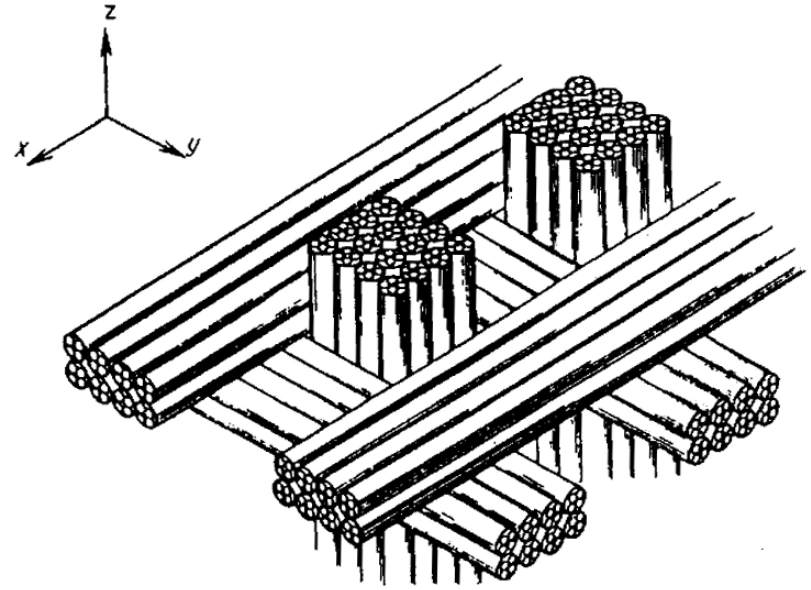
Для максимального использования возможностей армирующего каркаса он составлен из прямых нитей. В ортогональных 3D-структурах тип и количество нитей на единицу длины можно варьировать во всех трех направлениях (рис).



# Углерод-углеродные композиционные материалы



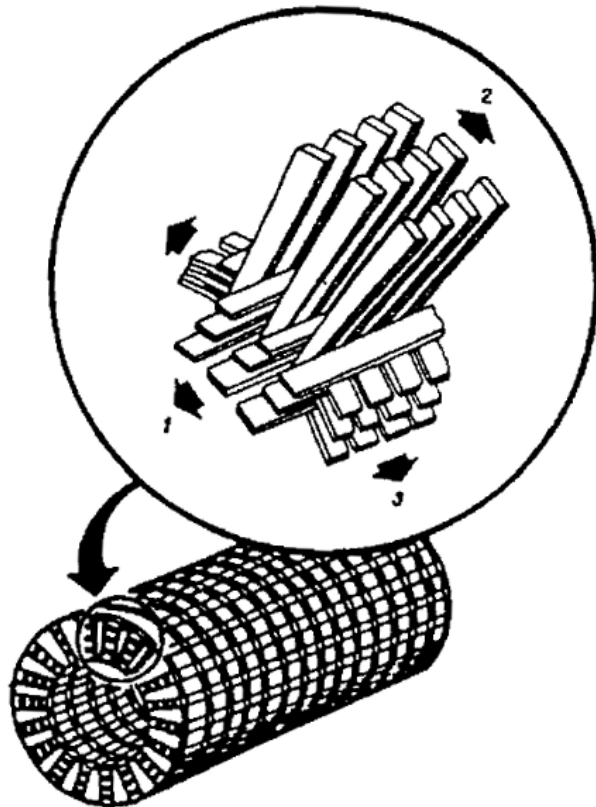
Например, укладка 1.1.1 является сбалансированной с одной нитью на единицу длины в направлениях X, Y и Z. Если считать нити твердыми стержнями квадратного поперечного сечения, то предельная плотность упаковки структурного элемента сбалансированной ортогональной 3D-структуры равна 75 % , а остальные 25 % объема составляют пересекающиеся пустоты. Для получения малых пустот применяют плотную укладку нитей малого диаметра и схемы укладки с соотношением числа нитей 1.1.1



Типичная схема укладки волокон малого диаметра в ортогонально армированном материале с целью получения высокой плотности каркаса

Более равномерное распределение волокон в объеме обеспечивают за счет разных модификаций основной ортогональной 3D-структуры. Для получения композита с изотропными свойствами применяют структуры 4 D, 5 D, 7 D, 11 D.

Проектирование схем армирования цилиндров и других тел вращения основано на тех же варьируемых параметрах, что и проектирование тканей и блоков. Схематически тканая структура тела вращения показана на рисунке.

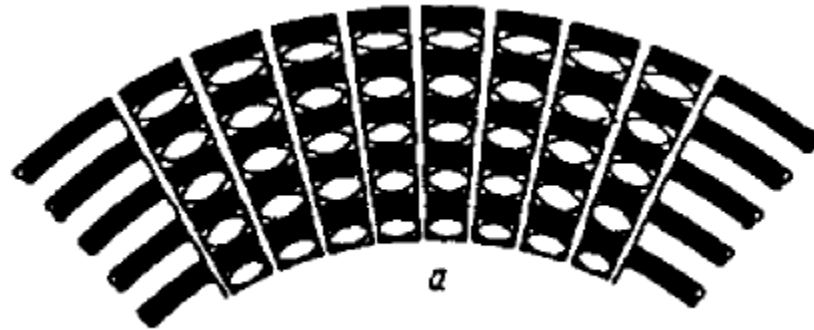


Расположение нитей в трехнаправленном цилиндрическом переплетении:

1 – радиальные нити; 2 – осевые; 3 – окружные

# Углерод-углеродные композиционные материалы

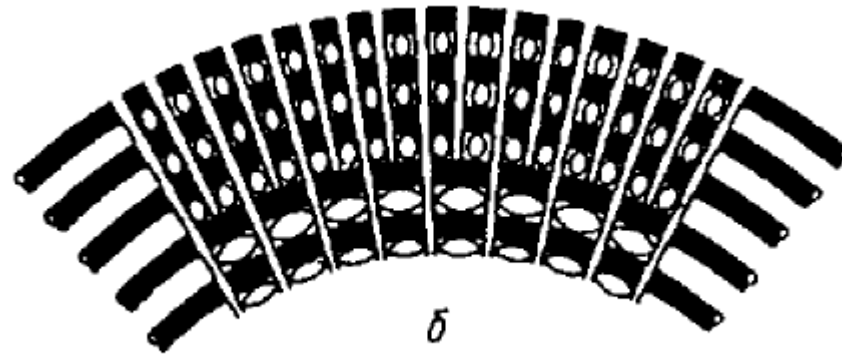
Для обеспечения постоянной плотности армирования цилиндрических изделий с увеличением расстояний между радиальными нитями при приближении к наружному диаметру цилиндра диаметр осевых пучков нитей следует увеличивать.



Компенсация осевых и  
радиальных нитей:

$a$  — компенсация осевых нитей от  
внутреннего к наружному диаметру  
изменением диаметра осевых  
нитей;

Другой способ обеспечения постоянной плотности структуры цилиндрических изделий основан на введении в основную схему армирования по мере приближения к наружному радиусу укороченных радиальных элементов.

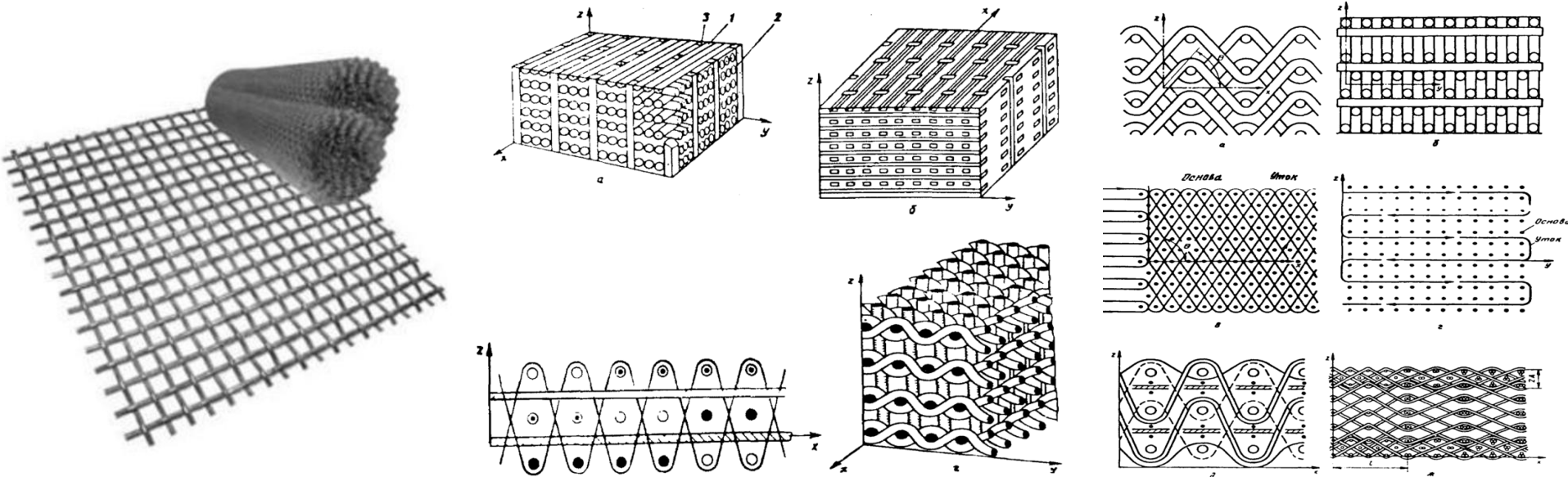


Компенсация осевых и  
радиальных нитей:

**б** – компенсация радиаль-  
ных нитей изменением их длины

Тканые армирующие каркасы могут также иметь форму усеченных конусов.

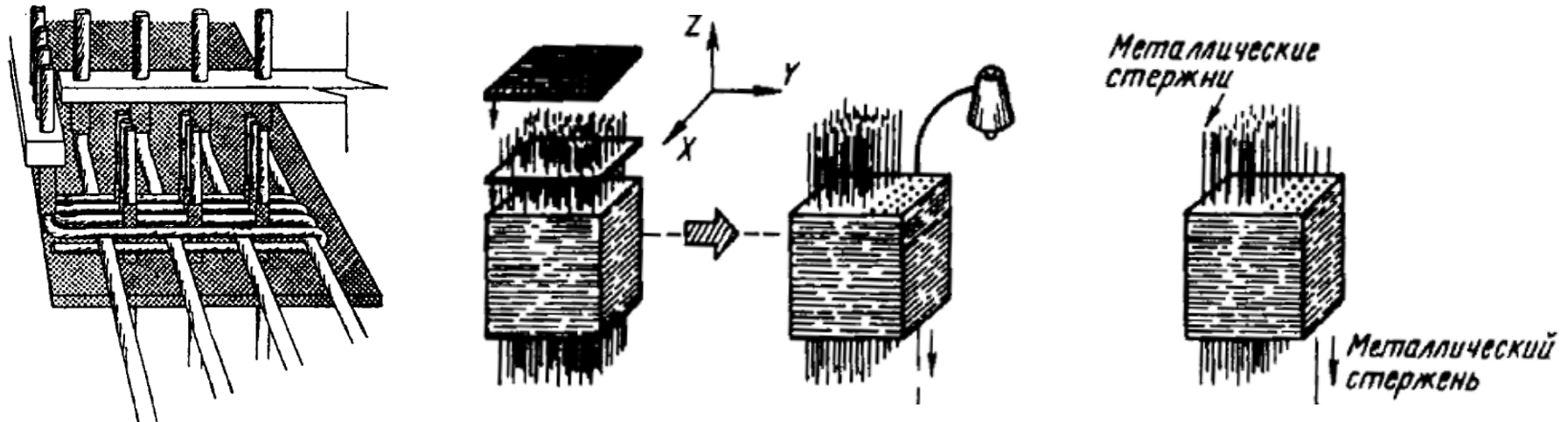
Современная технология позволяет изготавливать изделие в виде комбинаций цилиндра и усеченного конуса или цилиндра с полусферическим куполом, выполненных как одно целое.



## 4.2. Изготовление многонаправленных структур

Многонаправленные структуры УУКМ изготавливают различными методами, главными из которых являются:

- ткачество сухих нитей;
- прошивка тканей;
- сборка жестких прутков (полученных из нитей методом пултрузии);
- намотка и плетение;
- комбинированные методы.

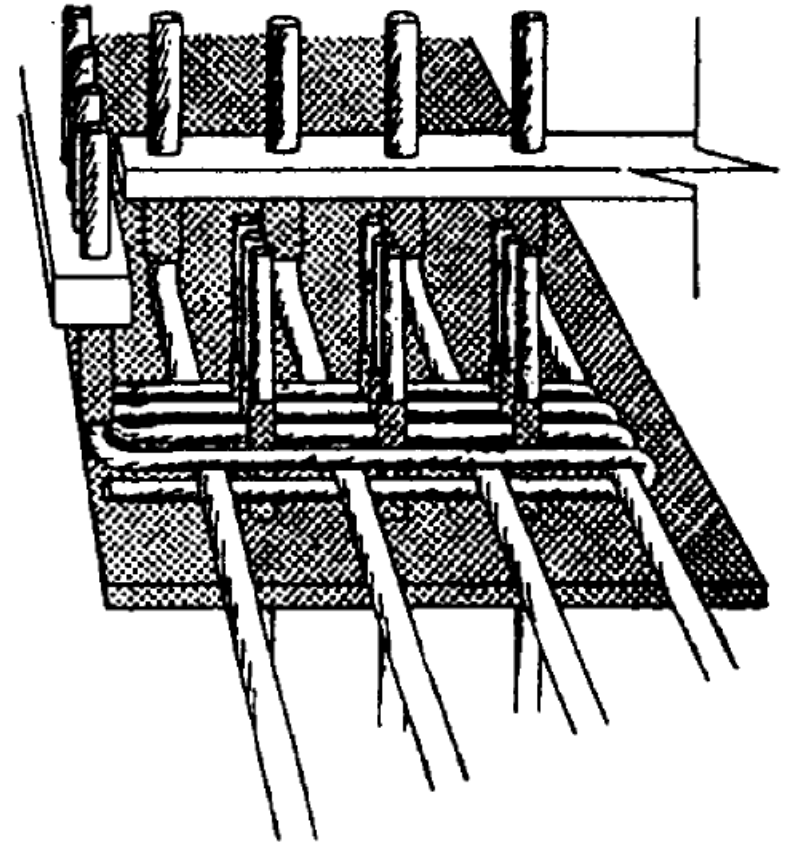




# Изготовление многонаправленных структур. Метод сухого ткачества



Этот метод широко используют в производстве УУКМ. Процесс изготовления 3D ортогональных блоков состоит в последовательном размещении на определенном расстоянии горизонтальных рядов прямых нитей в направлении  $x$  и  $y$ . Все смежные нити в слоях с направлением  $x$  и  $y$  отделены рядом тонких спиц или трубок. После того, как подбором горизонтальных слоев  $x$  и  $y$  достигнуты необходимые размеры заготовки, эти спицы заменяются вертикальными армирующими нитями, образующими направление  $z$ .



**Рис. 1.34.** Схема раскладки трехнаправленного (3D) армирующего каркаса .

Кроме того, разработан модифицированный вариант ортогональной структуры 3Д в котором нити в плоскости  $x$  и  $y$  заменены тканью со структурой 2D. Каркасы такого типа в соответствии с технологией изготовления были названы проколотыми тканями.

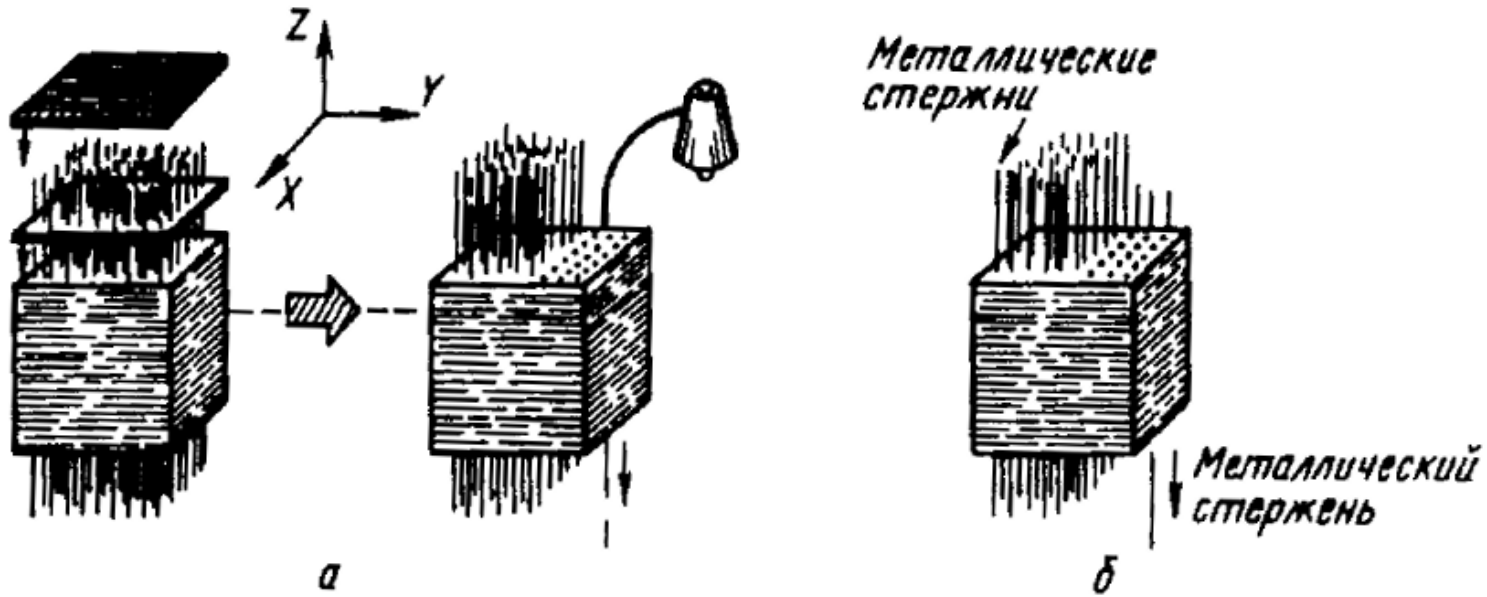


Схема процесса изготовления блока из проколотой ткани:

*а* – укладка графитовой ткани на металлические стержни; *б* – замена металлических стержней предварительно полимеризованными углепластиковыми стержнями



# Изготовление многонаправленных структур. Метод сухого ткачества



Для изготовления подобных структур слои из ткани надевают на решетку из вертикальных металлических прутков. На конечном этапе изготовления металлические прутки-спицы, которые образуют направление  $z$  данной структуры, заменяют графитовыми нитями или предварительно отвержденными жесткими стержнями из нити и связующего. Блоки из проколотой ткани имеют более высокое общее объемное содержание волокон и плотность.

Применение проколотых тканей делает технологию изготовления многонаправленных блоков более разнообразной за счет возможности варьирования структуры ткани, типа и характера распределения нитей.



# Изготовление многонаправленных структур. Метод прошивки ткани



Данный метод заключается в укладке армирующих тканей на оправку и последующей прошивки уложенных тканей углеродными нитями в радиальном направлении. С этой целью разработана и применяется малогабаритная швейная машина «Пион-1». Она позволяет прошивать ткани толщиной до 3 мм.

Многонаправленные структуры можно изготовить и без применения ткачества. Основными элементами для изготовления заготовок в этом случае являются предварительно отвержденные пучки нитей в виде стержней, которые изготавливают методом пултрузии из высокопрочных углеродных волокон и фенольных связующих.

Полимеризованные пучки нитей (стержни) имеют диаметр от 1,0 до 1,8 мм и шестиугольное поперечное сечение для достижения максимальной плотности упаковки. Вследствие высокой эффективности упаковки объем волокон достигает 75 %.



# Изготовление многонаправленных структур. Метод прошивки ткани



Для изготовления многонаправленных цилиндрических структур применяется и метод намотки.

Согласно этому методу радиальная арматура представляет собой предварительно изготовленные композитные подэлементы из графитовых нитей и фенольных связующих. Собранные вместе на цилиндрической оправке радиальные подэлементы образуют решетку с пазами в окружном и осевом направлениях. Далее в эти пазы заматывают предварительно пропитанные ленты из однонаправленных высокомодульных графитовых волокон. При этом окружные слои чередуются с осевыми. Для получения разного объемного содержания волокон в окружном и осевом направлениях изменяют размеры и форму радиальных элементов.

После завершения работ по изготовлению каркаса заготовки тем или иным методом полуфабрикат подвергается отверждению для его превращения в УУКМ.



## 4.3. Уплотнение многонаправленных структур



Переработку полуфабриката с многонаправленной структурой в предельно плотный УУКМ можно осуществить разными технологическими методами.

Выбирая полимерную матрицу для пропитки, последующего уплотнения каркаса и перевода его в УУКМ, учитывают следующие характеристики матрицы и продукта ее пиролиза:

- а) вязкость,
- б) выход кокса,
- в) микроструктуру кокса,
- г) кристаллическую структуру кокса.

Все эти характеристики зависят от свойств матрицы, а также от давления и температуры, изменяющихся в процессе получения УУКМ.



# Уплотнение многонаправленных структур



Терморезактивные фенольные и фурфуроловые смолы и пек из каменноугольной смолы или нефти являются обычно исходными материалами для матрицы УУКМ.

Использование терморезактивных смол обусловлено их хорошей пропитывающей способностью и наличием обширной технологической базы. Большинство терморезактивных связующих полимеризуются при сравнительно низких температурах (<250 °С), а при пиролизе образуют стекловидный углерод, который не графитизируется при нагреве вплоть до 3000 °С. Содержание кокса у этих смол составляет от 50 до 56 % по Массе.

Терморезактивные смолы имеют менее плотный и менее графитизированный кокс, чем каменноугольная смола. Низкая плотность кокса ограничивает уровень плотности УУКМ. Однако в необходимых случаях в некоторых конструкциях целесообразно иметь неграфитизированную матрицу.



# Уплотнение многонаправленных структур



Тем не менее эффект графитизации фурфуроловых смол можно получить, используя в процессе уплотнения высокие давления. Предполагают, что внешние нагрузки, приложенные в интервале температур 400...600 °С, увеличивают подвижность молекулярной структуры, склонной к графитизации. Смолы, отвержденные и карбонизированные под давлением, не имеют усадочных трещин, которые характерны для смол, карбонизированных при малом давлении.

Пропиточные пеки, применяемые для получения УУКМ, представляют собой смеси полуциклических ароматических углеводородов. Они имеют низкую температуру размягчения (94...101 °С), низкую вязкость расплава и высокое содержание кокса (до 62 %).



# Уплотнение многонаправленных структур



В отличие от пространственно сшитых терморезистивных смол они являются термопластическими. Содержание кокса в каменноугольной смоле при атмосферном давлении составляет всего 50 %, однако пиролиз при температуре 550 °С в азотной атмосфере при давлении около 10 МПа повышает содержание кокса до 90 %.

Наиболее широко применяемым методом введения углеродной матрицы в многонаправленный армирующий каркас является пропитка под низким давлением с последующей карбонизацией полученного композита в инертной среде. Насыщение матрицы проводят или в ванне при атмосферном давлении, или в вакуумной камере.



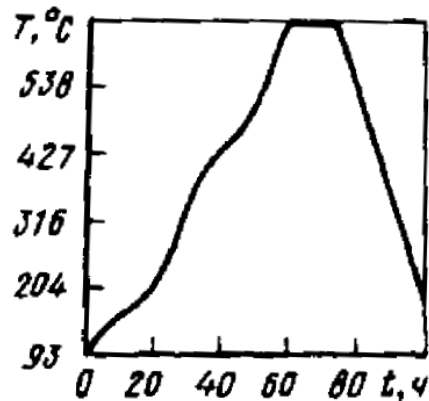
# Уплотнение многонаправленных структур



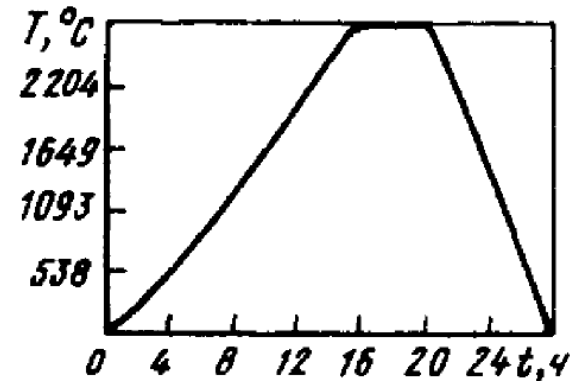
УУКМ, пропитанные смолами, отверждают и термообработывают для завершения процесса отверждения, а затем подвергают карбонизации и, если требуется, графитизации.

УУКМ, пропитанные пеками, не отверждают, а сразу подвергают карбонизации в азотной атмосфере.

Характерный цикл карбонизации и графитизации показаны на рисунках.



Характерный цикл карбонизации



Характерный цикл графитизации



# Уплотнение многонаправленных структур



Для полного завершения процесса насыщения углеродом при создании УУКМ цикл пропитка — термообработка повторяют многократно, причем графитизация не является обязательным этапом каждого цикла. Этим методом целесообразно изготавливать УУКМ, в которых допускается открытая пористость около 10 %.

При использовании пропитки под высоким давлением повышается содержание кокса и сокращается время изготовления УУКМ. Уплотнение под высоким давлением отличается от пропитки при низком давлении только дополнительным давлением при карбонизации.

При подготовке процесса уплотнения под высоким давлением пропитку заготовок проводят, как правило, горячим пеком.



# Уплотнение многонаправленных структур



Твердый пек расплавляют в вакууме в емкости, нагретой до 250 °С; заготовки (т.е. армирующие каркасы), помещенные в металлические контейнеры, нагревают в вакууме до такой же температуры в емкости, расположенной рядом.

Горячий жидкий пек через трубы, соединяющие обе емкости, продавливается азотом в контейнеры с заготовками. Когда заготовки полностью погружены в горячий жидкий пек, свободный объем емкости с заготовками заполняют азотом для выравнивания давления и прекращения подачи пека.

Контейнеры с пропитанными жидким пеком заготовками, подготовленными для карбонизации под давлением, закрывают герметичными металлическими крышками. Обработку под высоким давлением проводят при изостатическом давлении в автоклаве или в специальных газостатах.

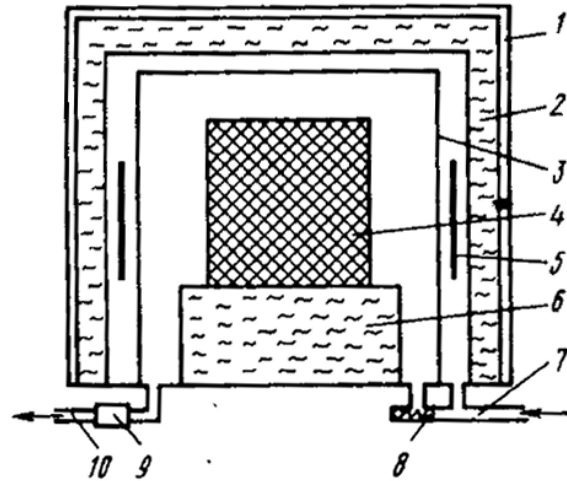
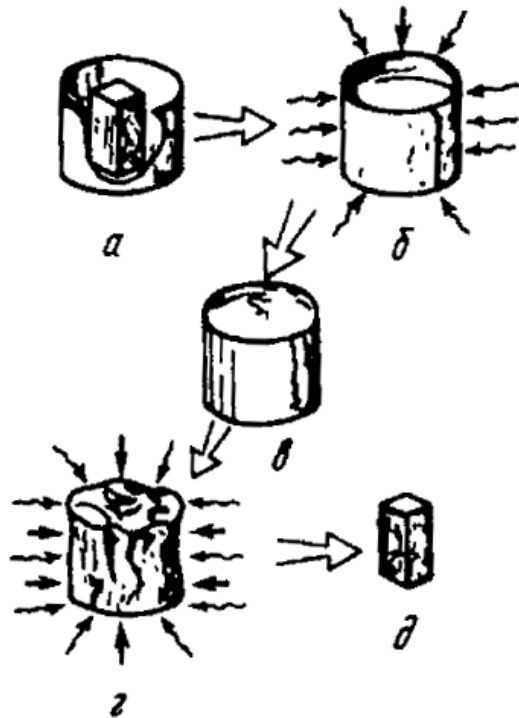


Схема устройства газостата:

1 – корпус; 2 – изоляция; 3 – реторта; 4 – контейнер с изделием; 5 – нагреватель; 6 – опорная решетка; 7 – ввод аргона; 8 – обратный клапан; 9 – дифференциальный клапан; 10 – вывод газа из камеры



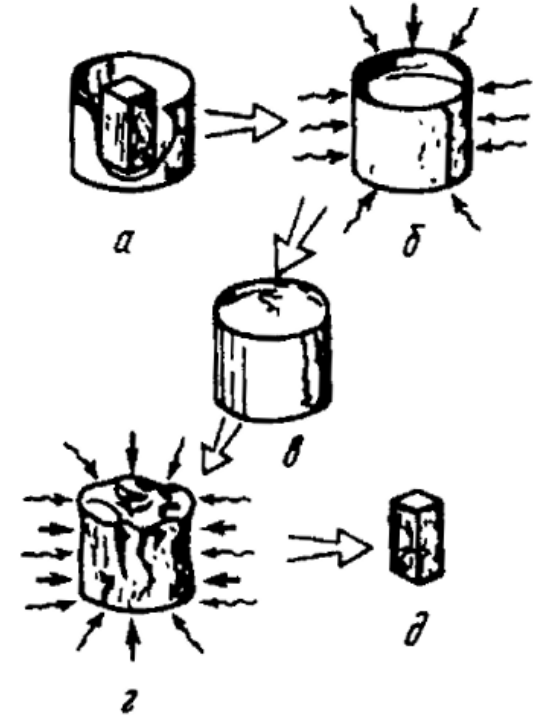
Последовательность операций цикла уплотнения под давлением:

*a* — подготовка образца; *б* — пропитка; *в* — герметизация и откачка контейнера; *г* — карбонизация; *д* — очистка образца

Изостатическое давление, приложенное к тонкому металлическому контейнеру, передается на расплавленный пек. При повышенных температурах этот металлический контейнер действует, по существу, как «резиновый мешок».

Схематически последовательность процесса давление—пропитка—карбонизация изображена на рисунке.

После обработки под давлением заготовки удаляют из металлических контейнеров и подвергают графитизации с регулируемой скоростью нагрева. Полный цикл обработки повторяют до достижения требуемой плотности композита. При этом продолжительность процесса составляет всего 7...14 ч, а во многих случаях удается получить заготовку за один цикл. В этом и заключается преимущество данного метода.



Последовательность операций цикла уплотнения под давлением:

*а* – подготовка образца; *б* – пропитка; *в* – герметизация и откачка контейнера; *г* – карбонизация; *д* – очистка образца



# Способ осаждения пироуглерода из газовой фазы



Способ осаждения пироуглерода из газовой фазы заключается в разложении газообразных углеводородов (метана, бензола, ацетилена и т.п.) или смеси углеводородов с разбавляющим газом (инертным газом или водородом) под действием высоких температур на углерод, который осаждается на нагретой поверхности волокна, и газообразные продукты реакции, которые удаляются из реакционной камеры.

Осаждающийся углерод создает соединительные мостики между волокнами. Процесс осаждения проводится в вакууме, в индукционных печах под давлением или в обычных печах сопротивления. Разработано несколько технологических методов получения пироуглеродной матрицы.

Изотермический метод основан на том, что заготовка находится в равномерно обогреваемой камере. Равномерность обогрева в индукционной печи обеспечивается с помощью графитового сердечника. Углеводородный газ подается через днище печи и диффундирует через заготовку, осаждаясь на волокна.

Неправильный выбор температуры в печи приводит к поверхностному наслоению пироуглерода. Этот метод обычно применяют для изготовления тонкостенных деталей, поскольку в этом случае заполняются преимущественно поры, находящиеся у поверхности изделия.

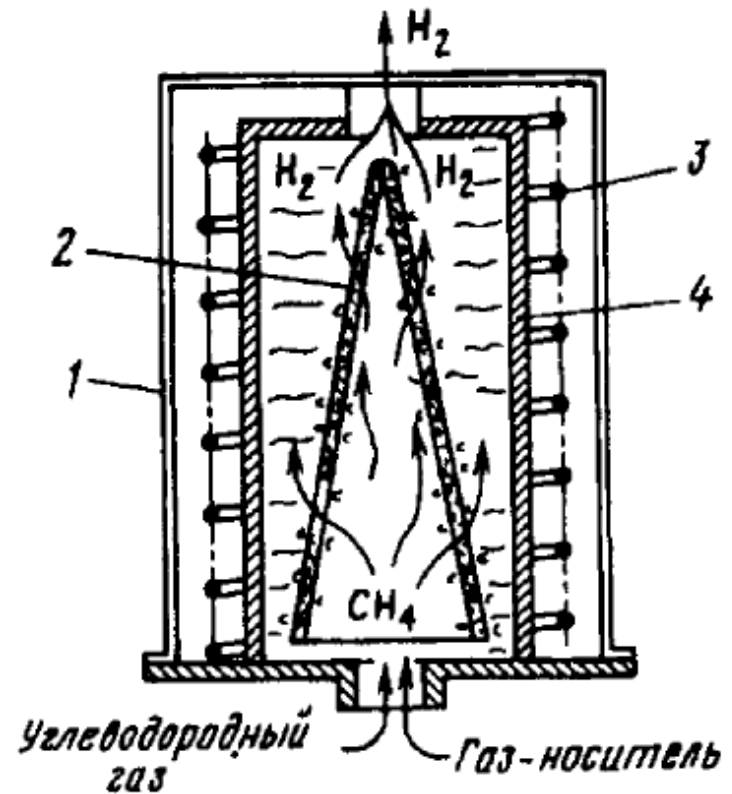


Схема камеры для изотермического процесса химического осаждения:  
1 – кожух; 2 – углеродный каркас; 3 – индукционная катушка; 4 – графитовый сердечник

Для объемного насыщения каркаса и получения толстостенных заготовок (блоков) применяют неизотермический метод или метод термических градиентов. Заготовку в этом случае размещают на обогреваемой оправке-сердечнике или металлическом стержне, через который пропускают ток

Углеводородный газ подается со стороны печи, имеющей более низкую температуру. В результате такого градиента температур осаждение пироуглерода происходит в наиболее горячей зоне, т.е. в области сердечника или стержня.

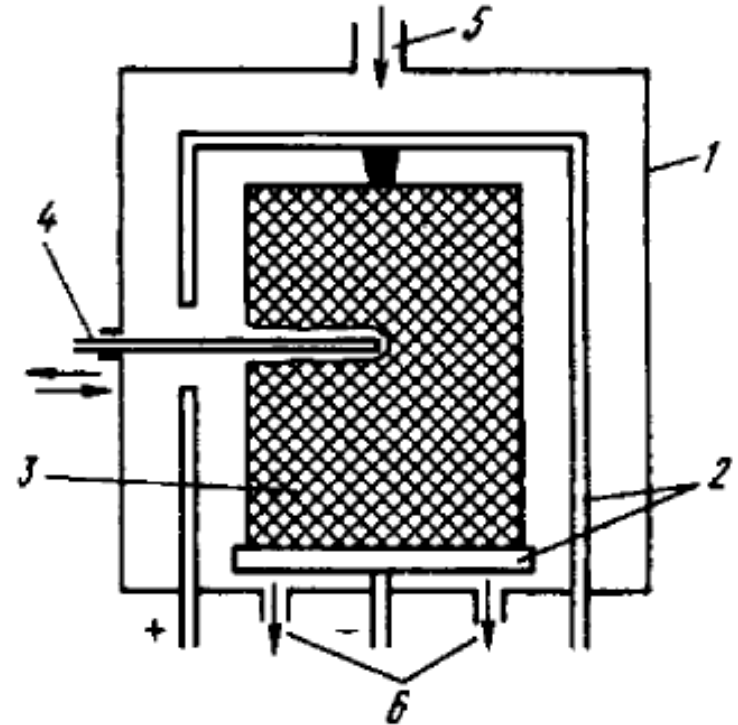


Схема печи для осаждения пироуглерода по методу температурного градиента:

1 – корпус печи; 2 – тоководы; 3 – изделие; 4 – термопара; 5 – ввод углеводорода; 6 – выход продуктов реакции



# Изотермический метод



Повышая температуру сердечника или стержня, например путем увеличения тока, создают условия для осаждения углерода в следующей зоне от центра к периферии.

Таким образом, увеличение плотности и теплопроводность УУКМ приводит к перемещению температурного фронта осаждения, что обеспечивает в конечном итоге полное насыщение заготовки углеродом.

Этот метод позволяет получать УУКМ с высокой плотностью (1700... 1800 кг/м<sup>3</sup>), характеризуется большой скоростью осаждения, заполнением крупных пор и объемным уплотнением материала.

Однако эти показатели дают самое общее представление о возможностях УУКМ, поскольку современные данные не позволяют сделать точную количественную оценку влияния схем укладки типа матрицы, метода изготовления на механические и тепловые характеристики УУКМ.



# Характеристики углерод-углеродных и углеграфитовых материалов



Метод получения	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность при растяжении $\sigma_1^+$ , МПа	Прочность при сжатии $\sigma_1^-$ , МПа	Модуль упругости $E_1 \cdot 10^{-3}$ , МПа	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	КЛТР $\alpha \cdot 10^6$ , 1/К	Структура, тип матрицы
УУКМ на основе высокомолекулярных волокон (осаждение из газовой фазы)	1750	75,0	200,0	30,0	6-8	2-3	3D-плетеная, пироуглерод
УУКМ на основе низкомолекулярных волокон (пропитка при низком давлении)	1500	80,0	185,0	23,0	5	6	Тканевая, фенольная смола
УУКМ на основе высокомолекулярных волокон (пропитка в газостате)	1700	91,0	99,0	31,0	3,8	2,6	Тканевая, фенольная смола
УУКМ на основе высокомолекулярных волокон (осаждение из газовой фазы)	1800	100,0	200,0	42,0	10	4	4D-плетеная, пироуглерод
Графит ЦМ-Р	1960	13,0	75,0	53,0	110-130	3,4	—



# УУКМ в промышленности



УУКМ являются самыми перспективными материалами для конструкций, работающих при высоких температурах. Из них изготавливают высокотемпературные подшипники ядерных силовых установок, носовые обтекатели ракет, вкладыши критического сечения двигателей, сопловые блоки, лопатки турбин, детали тормозных устройств самолетов и т.д.

Для широкого внедрения в промышленность УУКМ одной из важнейших проблем является снижение их стоимости. Решающую роль может сыграть создание нового поколения дешевых углеродных волокон, а также разработка промышленной технологии их изготовления.



# Перспективы применения УУКМ



Кроме упомянутых изделий авиационной и ракетно-космической техники, УУКМ имеют широкие перспективы применения в промышленности.





## Изготовление пространственных армирующих структур (ПАС)

В основе производственного процесса изготовления углерод-углеродных конструкций находятся технологические процессы изготовления каркасов и насыщения их матричным материалом.

Наиболее перспективным видом армирования УУКМ конструкционного назначения, является многонаправленное пространственное армирование.

Такие образования называют пространственными армирующими структурами, а составляющие их компоненты – элементами пространственных армирующих структур (ЭПАС).



# Изготовление пространственных армирующих структур



Для изготовления каркасов используют технологические методы намотки и выкладки, сшивки, ручного и автоматизированного плетения, ткачества. Кроме того, каркасы можно собирать из заранее отформованных (углеродных жгутов) и отвержденных стержней.

Основным структурным элементом ПАС из прямолинейных ЭПАС является параллелепипед, у которого три ребра, шесть диагоналей граней и четыре длинных внутренних диагонали образуют тринадцать направлений. Если параллелепипед является кубом то, комбинируя направления трех подгрупп, можно образовать уравновешенные (сбалансированные) системы.

Всего существует семь хорошо сбалансированных систем, изотропия которых растет с увеличением числа направлений: 5D, 7D (4+3), 9D (6+3), 10D (6+4), 13D (6+4+3).



# Характеристики сбалансированных 3D, 4D, 6D конструкций из пучков волокон круглого сечения



Основные характеристики некоторых ПАС приведены в таблице.

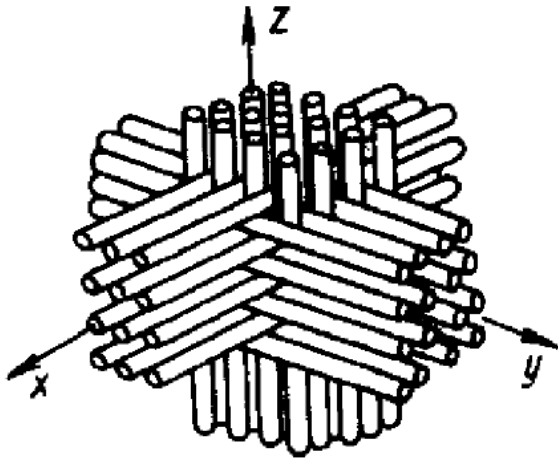
Наименование характеристик	Структура		
	3D	4D	6D
Размещение пучков волокон	Квадратная сетка	В шахматном порядке	В шахматном порядке
Углы между пучками стержней	2 × 90°	3 × 70,5°	1 × 90°, 3 × 60°
Компактность, %	59	68	49,4
Пористость	Закрытая	Открытая	Открытая
Изотропия	Слабая	Хорошая	Близкая к совершенной
Жесткость	Слабая	Хорошая	Отличная
Расслоение	Возможно	Невозможно	Невозможно
Минимальная поверхность стержней в срезе плоскости, %	19,7	34,0	24,7



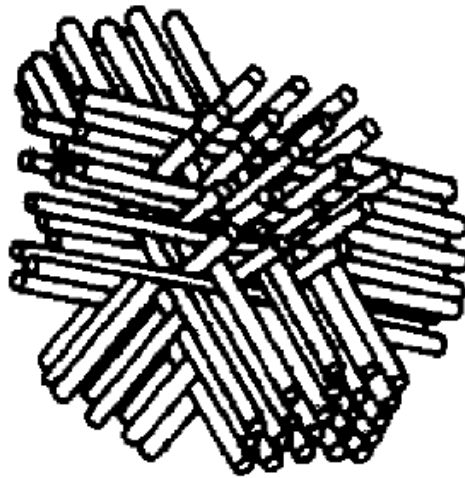
# Изготовление пространственных армирующих структур



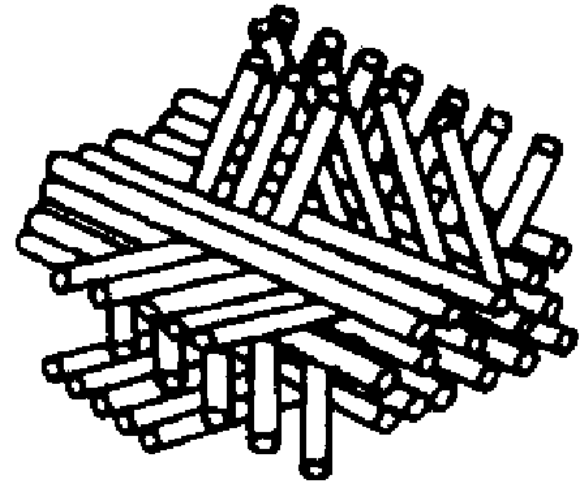
Для армирования УУКМ теплонапряженных толстостенных деталей практическое применение нашли ПАС типа **3D**, **4D**. При этом наиболее перспективной считают структуру **4D**, которая имеет преимущества не только перед **3D**, но и перед **5D** и выше, так как будучи более изотропными, последние в то же время сложны и трудны в изготовлении, а также имеют меньшее содержание волокон в сечении, чем **3D** и **4D**.



Структура ПАС 3D



Структура ПАС 4D



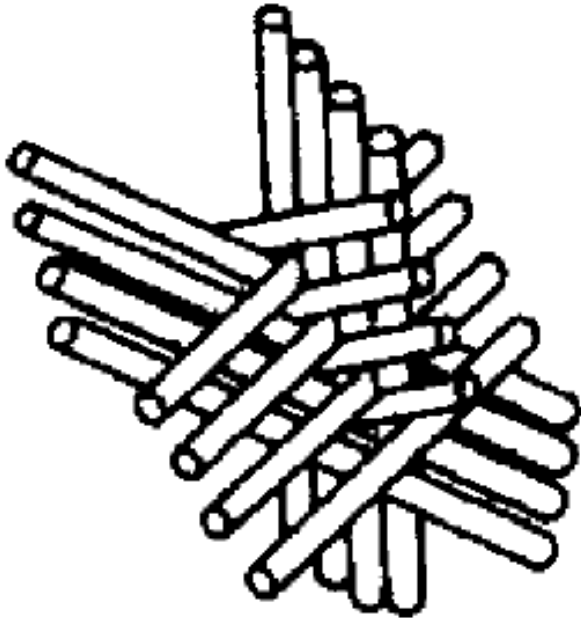
Структура ПАС 5D



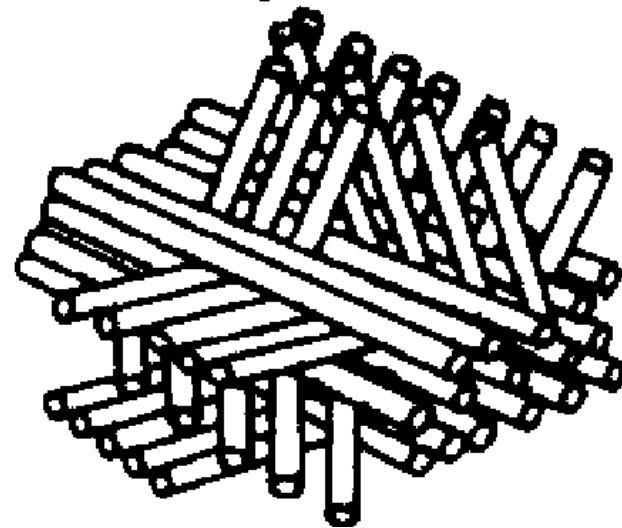
# Изготовление пространственных армирующих структур



Среди модифицированных ПАС особое место занимают структура **4D-Л**, у которой в плоскости  $x$ — $y$  размещаются три группы волокон, смещенные между собой на угол  $60^\circ$ , и структура **5D-Л**, у которой в плоскости  $x$ — $y$  в дополнение к волокнам со структурой  $0...90^\circ$  укладываются волокна под  $45^\circ$ .



Структура ПАС **4D-Л**



Структура ПАС **5D-Л**



# Изготовление пространственных армирующих структур



В том случае, когда необходимо улучшить свойства в одном направлении, но без риска расслоения, разработана **5D**-структура, в которой пять направлений в параллелепипеде определяются четырьмя длинными диагоналями и одним из трех ребер.

Практически это основной пучок волокон, заключенный в **4D**-структуру. Эта структура имеет те же преимущества, что и **4D**-структура. Она, как и **3D**, имеет осевую симметрию четвертого порядка относительно основного направления, что упрощает теоретические расчеты механических и теплофизических свойств изделий из таких упрочненных в одном направлении конструкций со структурой **5D**.



# Изготовление пространственных армирующих структур



Если необходимо упрочнение в двух направлениях, то используют **6D**-структуру, которая отличается от ранее рассмотренной тем, что два основных пучка ориентированы под углом  $90^\circ$  в одной плоскости по ребрам куба и связаны четырьмя более тонкими пучками, размещенными по типу **4D**.

В рассмотренных выше структурах все ЭПАС выполнены прямолинейными и объединены в комплекты, ориентированные по характеристическим направлениям. Уже само по себе существование этих преимущественных направлений указывает на отсутствие полной изотропии композита (в частности, в аспекте его механических и теплофизических свойств).



# Изготовление пространственных армирующих структур



Если в конкретных условиях эксплуатации (например, в условиях трения, абразивного износа, абляции) структурные свойства поверхности композита являются определяющими и если поверхность композита не ориентирована по характеристическим для данной структуры направлениям, то анизотропия обуславливает нежелательную гетерогенность свойств композита. Именно такая ситуация типична при использовании УУКМ (30-каркас из армирующих углеродных элементов, пропитанный углеродом) в высокоэнергетических газовых трактах.

Несмотря на то, что углерод-углеродный композит с прямолинейными ЭПАС в силу жаростойкости и механических и термических свойств обеспечивает высокие эксплуатационные свойства изделий, нужно учитывать определенные особенности материала.



# Изготовление пространственных армирующих структур



Если изделие изготовлено из УУКМ с прямолинейной ПАС, то в различных зонах поверхности тракта ПАС ориентирована к ней под разными углами. Это способствует неравномерной скорости уноса композитного материала в различных точках поверхности, омываемой горячими газами. В результате нарушается режим газового потока. Следствием этого является различная скорость уноса и снижение рабочих характеристик изделий.

С целью сочетания преимуществ пространственного армирования с равномерностью ориентации на цилиндрической поверхности разработан целый ряд ПАС, содержащих криволинейные армирующие элементы и практически воспроизводящих форму изделия, что делает их более экономичными.



# Изготовление пространственных армирующих структур



В зависимости от пространственной ориентации ЭПАС существует три принципиально отличающихся схемы армирования на основе **3D**-структуры и одна схема на основе **4D-Л**.

Согласно **первой** схеме, волокна ориентированы по радиальному направлению, x-волокна — по аксиальному и y-волокна — по циркулярному направлениям.

В соответствии со **второй** схемой z-волокна ориентированы по радиальному направлению, а x и y располагаются послойно в коаксиальных слоях по спиральным траекториям.

В **третьем** случае z-волокна располагаются в аксиальном направлении, а x и y расположены по перекрестным траекториям с равными углами наклона относительно радиального направления.



# Изготовление пространственных армирующих структур



И наконец, согласно **четвертой схеме** армирования, волокна располагаются по радиальному направлению, второй пучок волокон — по аксальному направлению, а третий и четвертый — по спиральным траекториям, причем элементы второго, третьего, четвертого направлений располагаются в коаксиальных слоях и взаимно переплетены.

Рассмотренные конструкции наполнителей обладают теми же преимуществами и недостатками, что и прямолинейные конструкции со структурой **3D** и **4D-Л**. Кроме того, они характеризуются переменной компактностью, уменьшающейся в радиальном направлении от внутренней поверхности к наружной.



# Изготовление пространственных армирующих структур



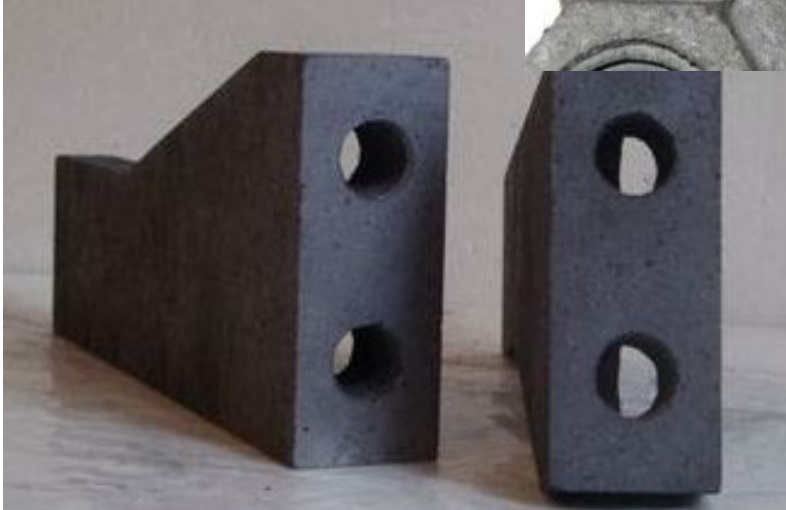
Разработаны также ПАС для пустотелых тел вращения на основе **4D структуры**. В зависимости от ориентации относительно оси изделия предлагается 16 различных вариантов.

Пространственные армирующие структуры получают плетением волокнистых жгутов или сборкой из жестких стержней.



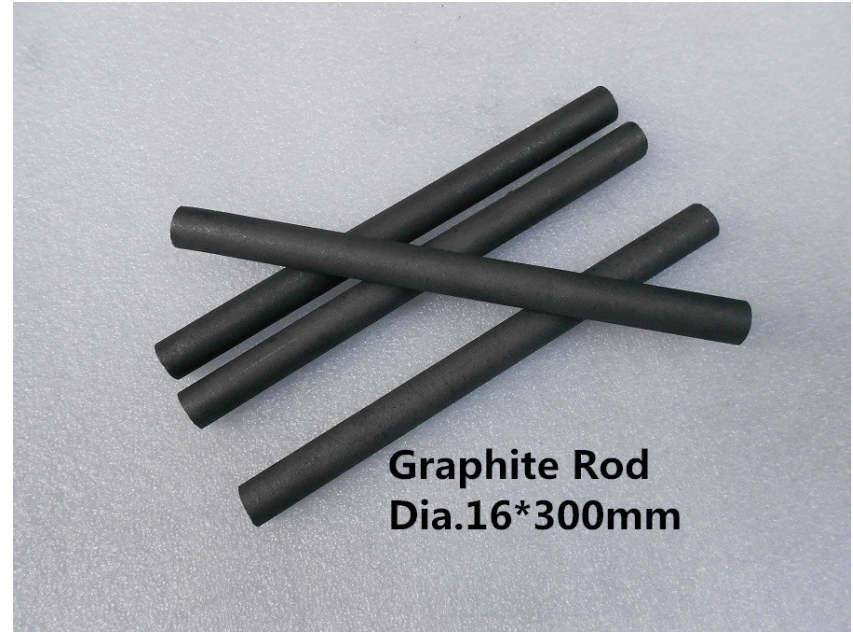


# Элементы из УУКМ различной структуры





# Элементы из УУКМ различной структуры





# Изготовление стержней и каркасов из УУКМ (углеграфитовых материалов)



При производстве на основе параллелепипеда любой модели жесткие стержни предпочтительнее гибкой пряжи. Стержни получают методом осаждения пироуглерода из газовой фазы или пултрузией, используя ориентированные волокна, пропитанные (в случае пултрузии) терморезактивными или термопластичными смолами.



При получении стержней методом пултрузии пропиткой 15...20%-ным водным раствором поливинилового спирта ПВС 16/1 волокнистый наполнитель сматывается с бобин, смачивается раствором в пропиточной ванночке, протягивается через отверстие определенной формы (фильеру); при этом отжимается излишек связующего, происходит уплотнение наполнителя и его формование по заданному профилю.

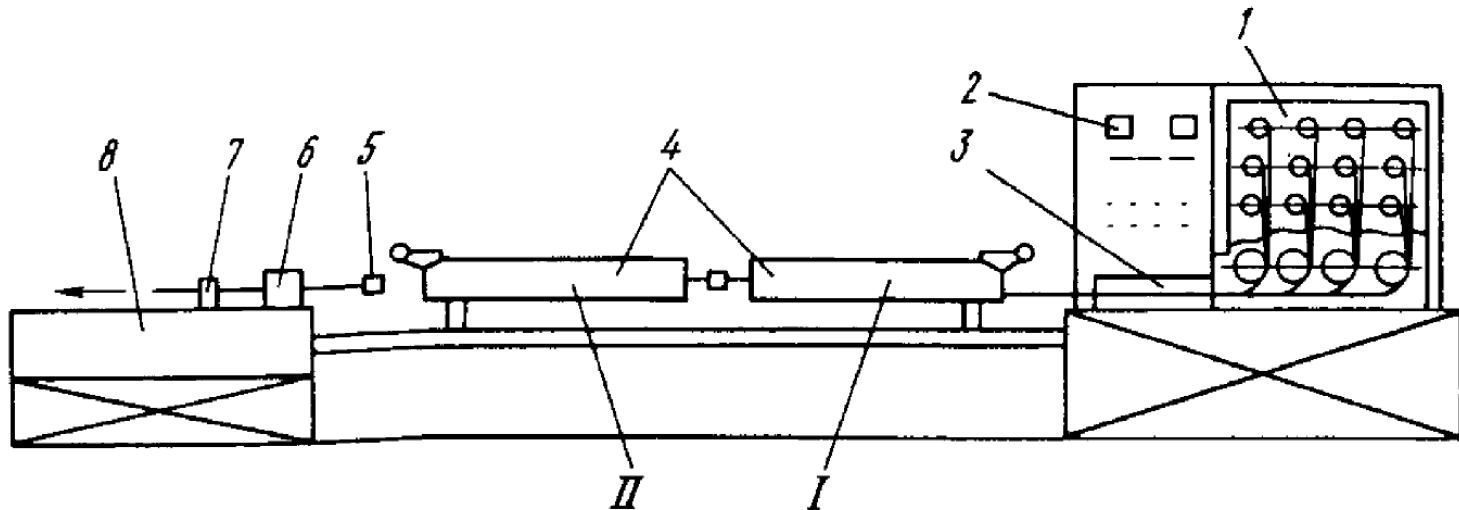


Схема установки для изготовления стержней УИС-3:

I – камера для сушки; II – камера для термической обработки; 1 – шпулярник; 2 – пульт управления; 3 – пропиточная ванночка; 4 – сушильные камеры; 5 – фильеры; 6 – механизм протяжки; 7 – механизм резки; 8 – контейнер

Сформированный профиль поступает в камеру, где он подвергается сушке при температуре 380...390 К, дополнительно уплотняется промежуточной фильерой, проходит термообработку в камере при температуре 450...550 К и окончательно уплотняется фильерой на выходе из камеры. Движение формуемого стержня осуществляется с помощью обрешиненных тянущих валков.

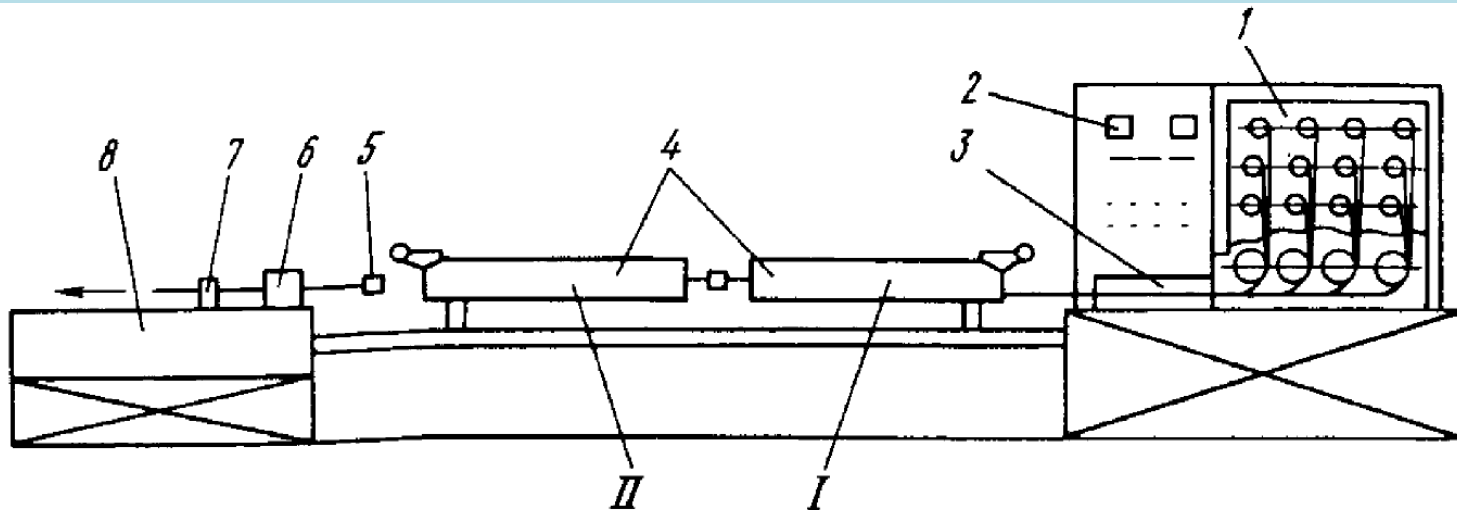


Схема установки для изготовления стержней УИС-3:

I – камера для сушки; II – камера для термической обработки; 1 – шпулярник; 2 – пульт управления; 3 – пропиточная ванночка; 4 – сушильные камеры; 5 – фильеры; 6 – механизм протяжки; 7 – механизм резки; 8 – контейнер

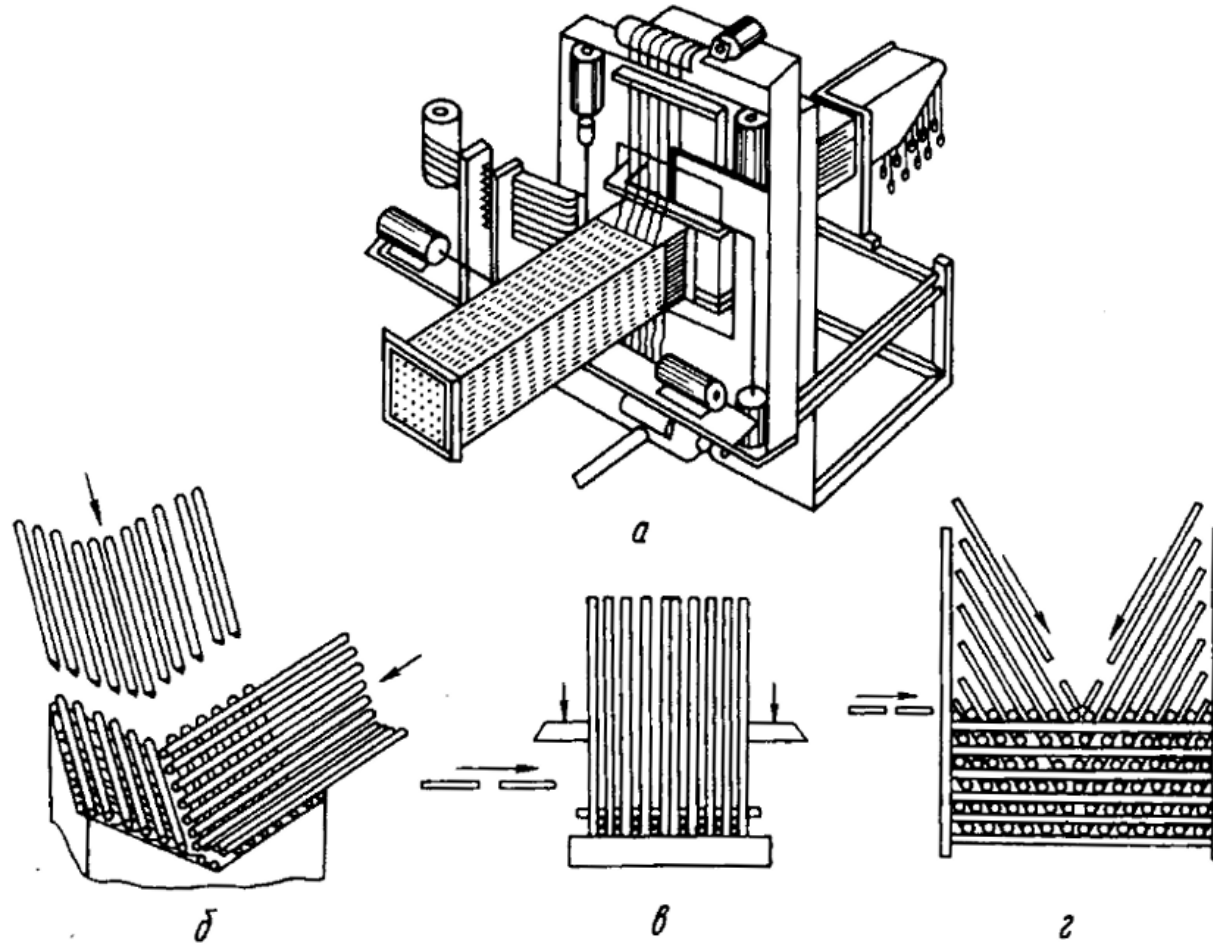


# Изготовление ПАС в виде блоков



Изготовление ПАС 3D в виде блоков можно осуществлять согласно нескольким технологическим схемам.





Схемы устройств для установки стержней:

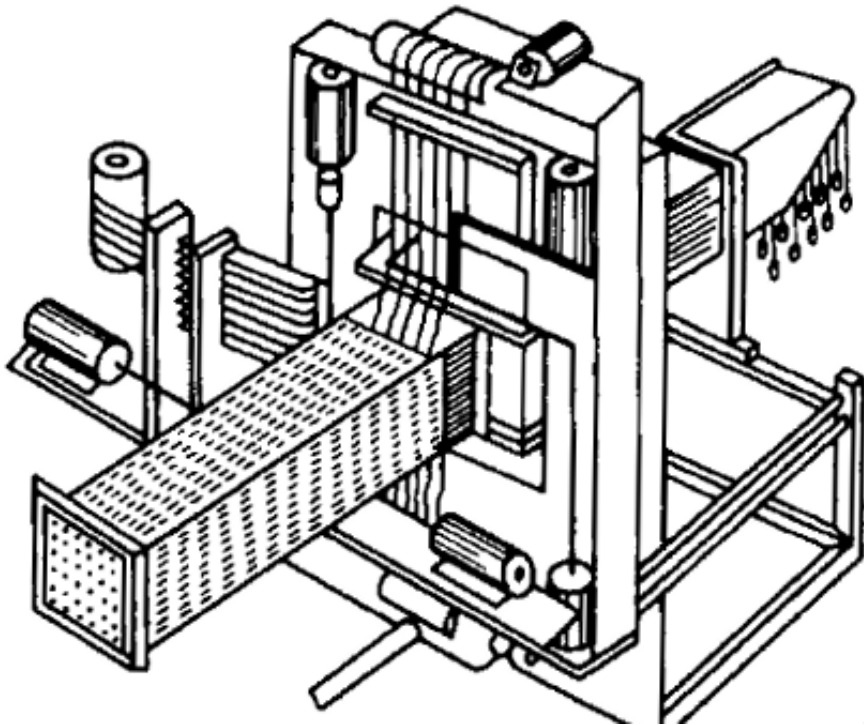
*а* – с одновременной пулгрозией; *б* – с предварительным проколом арматуры;  
*в* – с ориентирующим и внедряющим роликами; *г* – с дозатором кассетного  
типа



# Изготовления ПАС в виде блоков

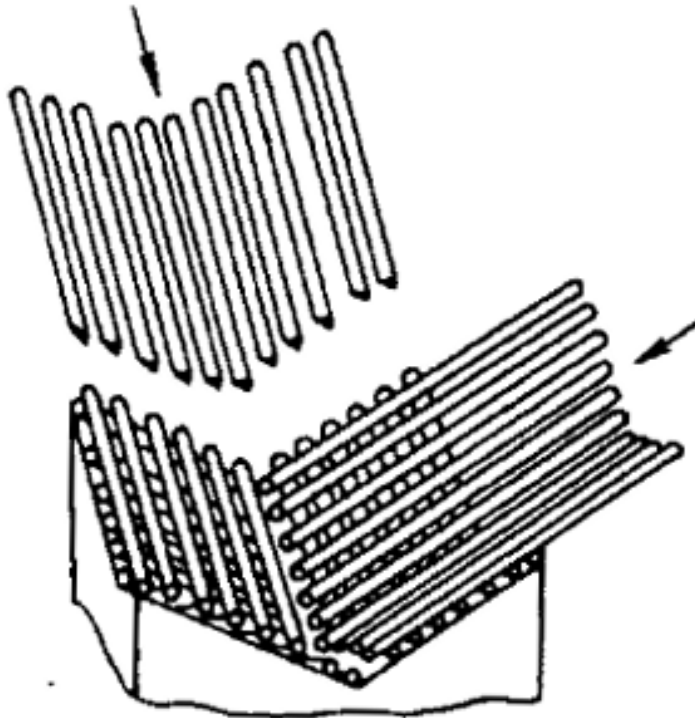


В одной из наиболее распространенных схем в вертикальном или горизонтальном направлении с заданным шагом устанавливаются волокна z-направления. Волокна двух других направлений с помощью системы рапир при их возвратно-поступательном перемещении размещаются послойно между волокнами первого направления (рисунок а)



Образующиеся при этом петли на выходе из формуемого изделия фиксируются кромочной нитью. После набора пакета заданной высоты осуществляется его отрезка в специальной фиксирующей оснастке и продолжается дальнейшая наработка материала.

Изготовление ПАС **4D** осуществляют преимущественно из стержней. В основу разработанной технологии положена особенность строения структуры **4D** заключающаяся в том, что в случае расположения стержней в виде V-образной плоскости все стержни данного направления одновременно входят в собираемую текстуру, причем граница входа проходит через ее центр.



В V-образном слое стержни параллельны между собой, расположены в плане с шагом, равным двум диаметрам стержней.

Геометрическая зона сборки, образующаяся при сборке V-образными слоями стержней, позволяет беспрепятственно подводить жестко зафиксированные стержни в середину структуры.



# Изготовления ПАС в виде блоков



В результате отрезок пути, проходимый устанавливаемыми в текстуру стержнями в соприкосновении со стержнями других направлений, сокращается вдвое, что позволяет снизить повреждаемость стержней. Кроме того, при сборке V-образными слоями каждый предыдущий слой выполняет функцию дополнительной направляющей (опоры) для последующего слоя, что позволяет повысить точность установки стержней и, следовательно, исключить ошибки при сборке текстуры. И наконец, технология обеспечивает возможность производства ПАС **4D** в непрерывном режиме машинным способом.

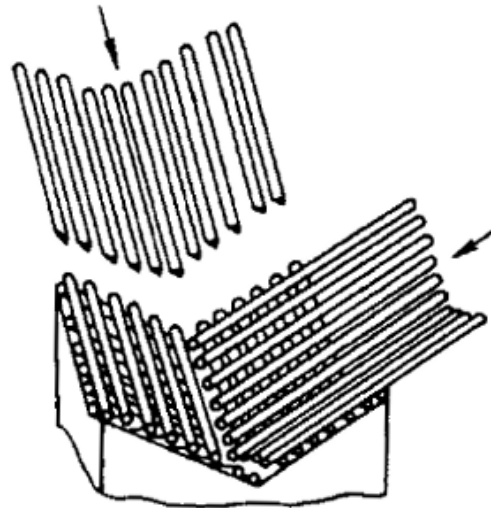


Схема с предварительным проколом арматуры

Изготовление ПАС *4D-Л* осуществляют согласно двум принципиально отличающимся технологическим схемам.

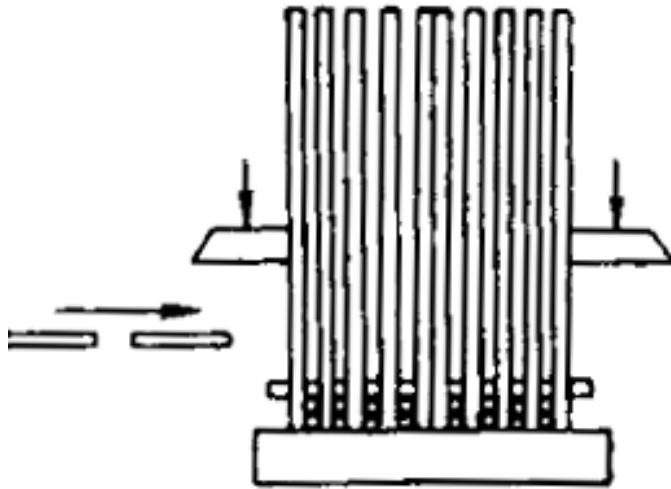


Схема с ориентирующим и внедряющим роликами

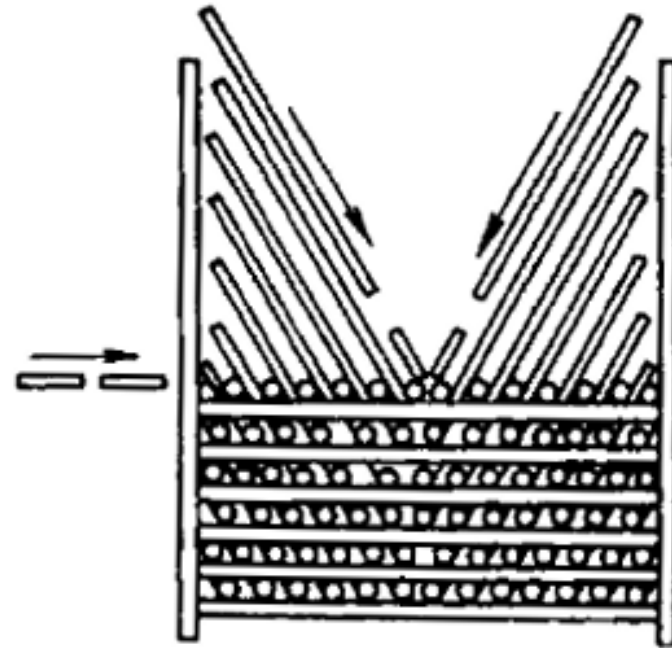


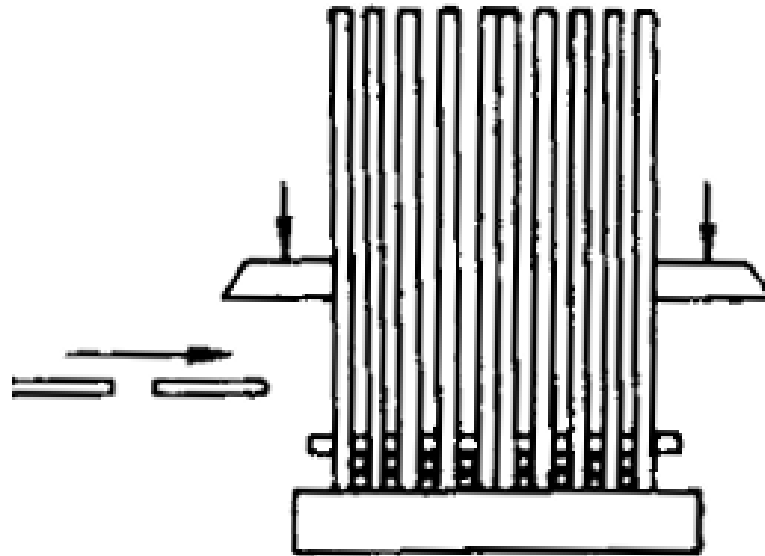
Схема с дозатором кассетного типа



# Схема с ориентирующим и внедряющим роликами



В соответствии с первой технологической схемой, структуру собирают в следующем порядке: стержни одной группы устанавливают в специальную перфорированную плиту в вертикальном направлении и шахматном порядке. Стержни трех других направлений размещают между стержнями вертикального направления параллельными слоями.

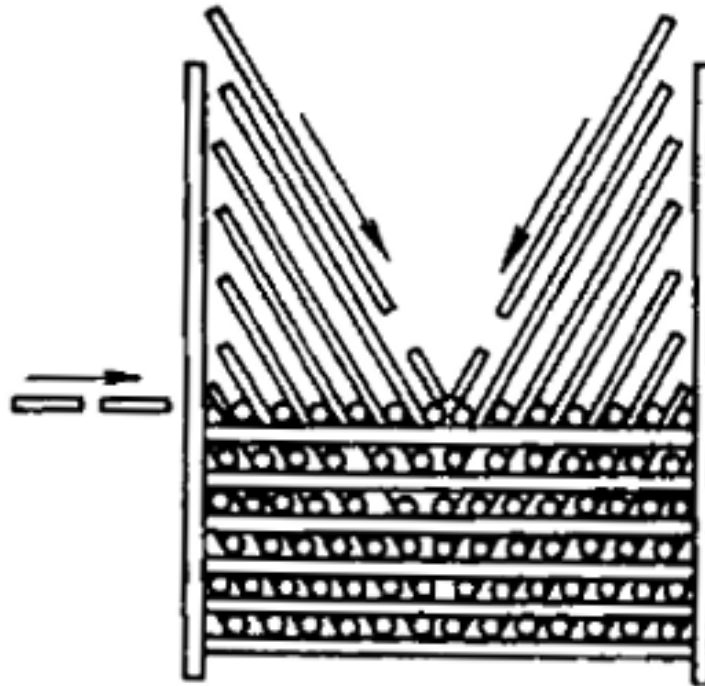




# Схема с дозатором кассетного типа



Согласно второй технологической схеме, стержни первой группы размещают в горизонтальной плоскости; между стержнями этой группы в горизонтальной плоскости размещают стержни второй группы. Стержни двух других групп входят между стержнями первой и второй групп с двух противоположных направлений под углом  $60^\circ$  к горизонтальной плоскости.





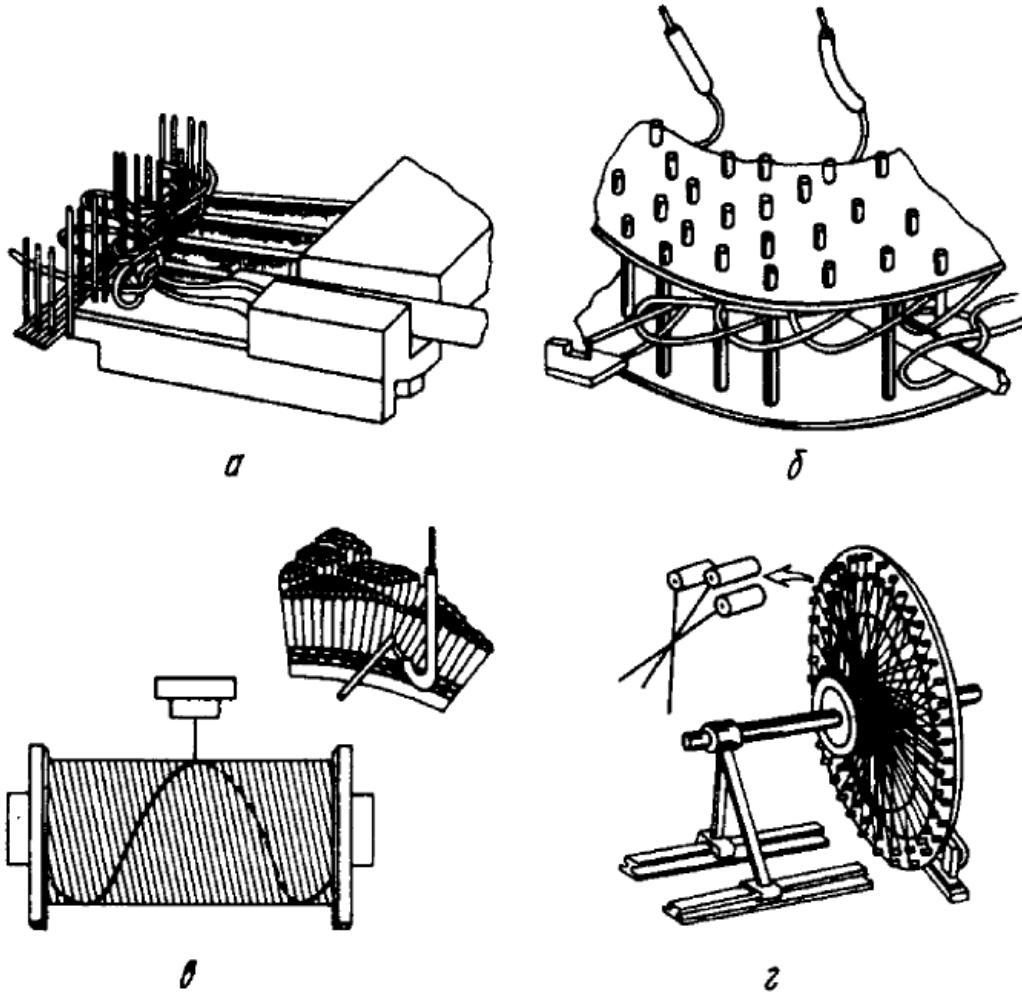
# Изготовления ПАС в виде блоков



Для усовершенствования процесса изготовления ПАС пустотелых тел вращения (оптимизация цены и качества) разработаны разные способы, в частности намотка нитей в двух направлениях между металлическими стержнями, которые потом заменяются нитями, т.е. комбинированная намотка, намотка волокон в двух или трех направлениях на приспособление типа “еж” из армирующих волокон, образующих третье направление; прошивка нитью или пробивка стержнями слоев ткани в радиальном направлении.

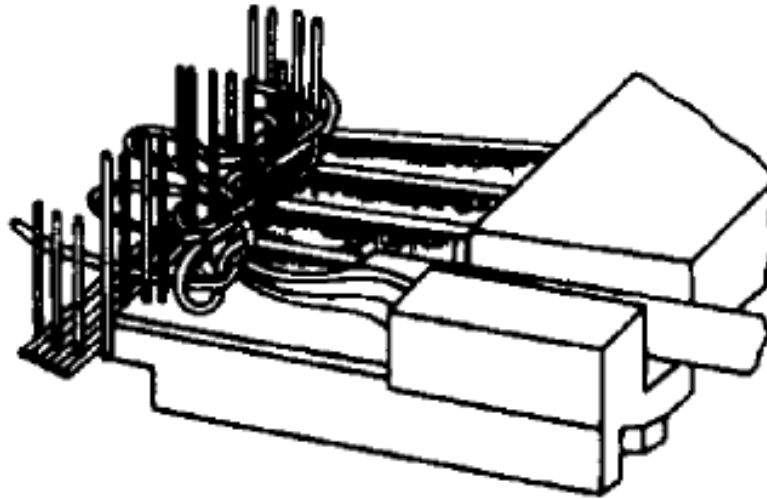
Для реализации криволинейных схемы переплетения металлические стержни, определяющие продольное направление заготовки, заправляют в специально просверленные пластины.

Рассмотрим основные технологические схемы получения криволинейных ПАС.



Технологические схемы получения криволинейных ПАС:  
*а* – радиально-циркулярная намотка; *б* – аксиально-спиральная намотка; *в* – радиально-спиральная намотка; *г* – аксиально-радиально-спиральная намотка

Между металлическими стержнями автоматически пропускают (наматывают) радиально и циркулярно пучки нитей (рисунок а).



Технологическая схема радиально-циркулярной намотки

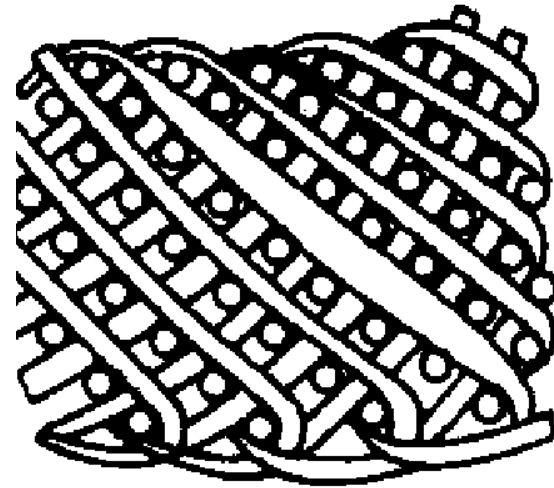
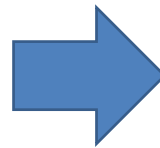


# Изготовления ПАС в виде блоков



Оборудование процесса позволяет изменить направление плетения, приближая форму заготовки к заданной. После намотки другая машина автоматически заменяет стержни нитями. Эту операцию называют прошивкой (шнуровкой). Способ позволяет получить 50%-ную экономию материалов и 15-кратный выигрыш времени по сравнению с ручным способом.

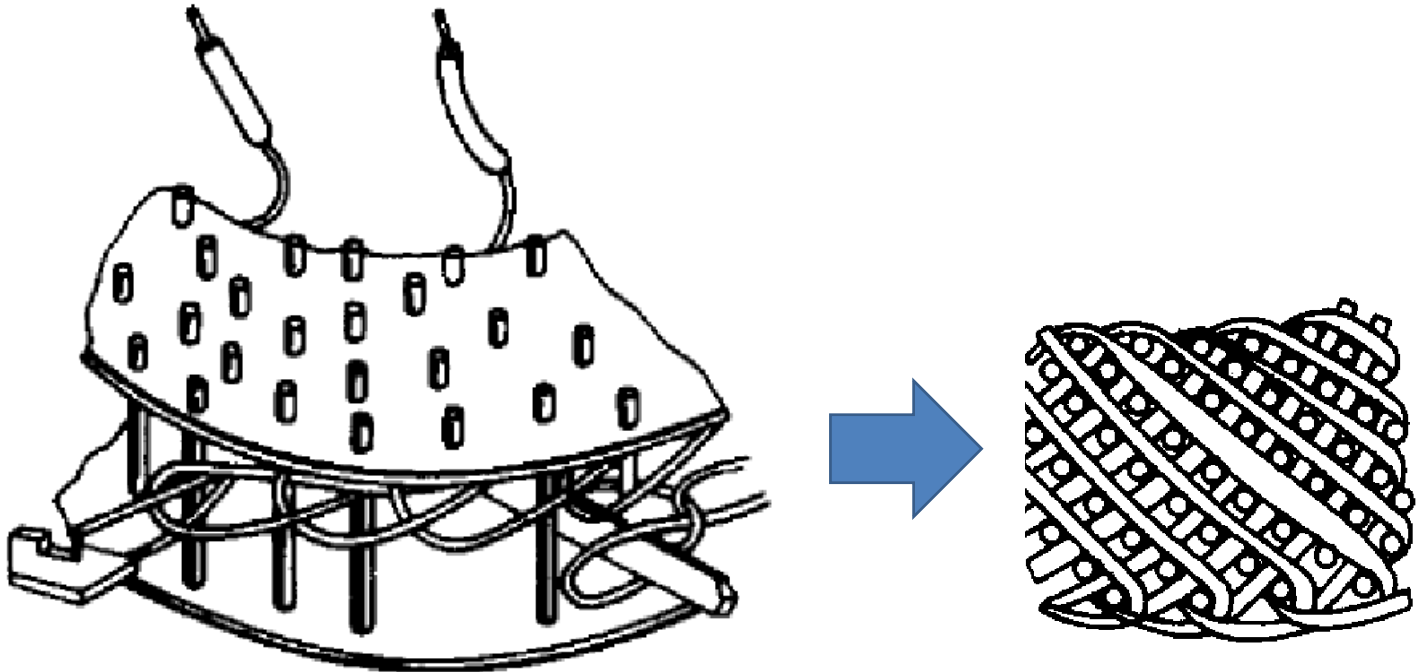
Развитием данного способа можно считать создание станка, реализующего схему переплетения согласно рисунку.



Аксиально-спиральная структура УУКМ

Особенность технологии заключается в том, что в процессе изготовления цилиндрической заготовки автоматической обеспечивается переплетение спиральных слоев нитей на внутренней поверхности контура (рисунок).

Технологическая схема аксиально-спиральной намотки

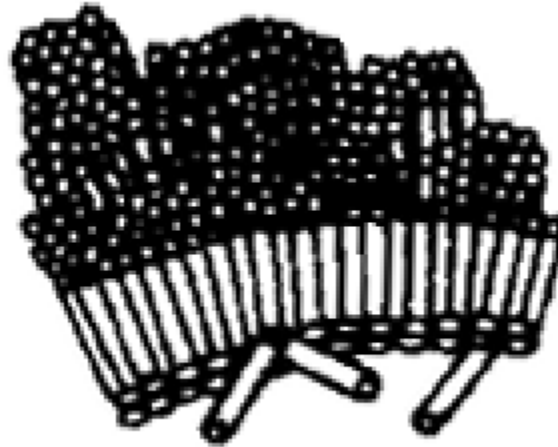




# Изготовления ПАС в виде блоков



Полые цилиндрические и конические ПАС получают на полностью автоматическом намоточном оборудовании в соответствии с двумя технологическими схемами.



Радиально-спиральная  
структура УУКМ

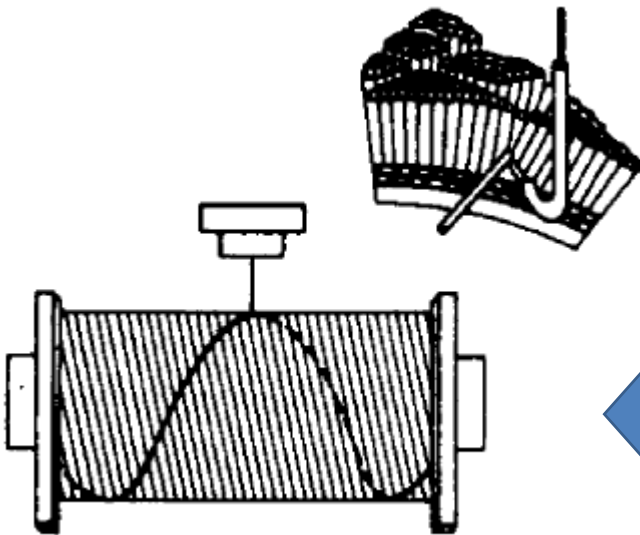


# Изготовления ПАС в виде блоков



Согласно первому способу, изготовление ПАС осуществляется за два этапа.

На первом этапе с помощью специального станка изготавливается ворсовая лента и наматывается на оправку. Получается так называемое ворсовое покрытие (ворсовый “еж”). Оправка с ворсовым покрытием перемещается на второй станок для намотки спиральных слоев (рисунок).



Технологическая схема  
радиально-спиральной  
намотки



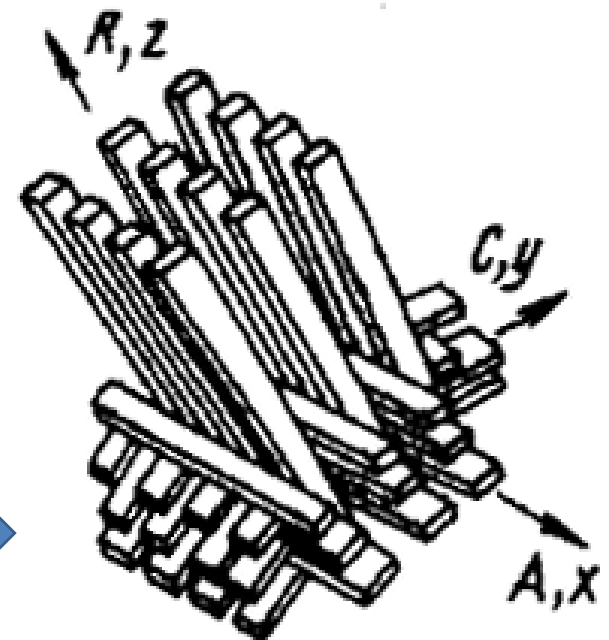
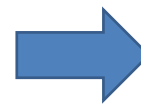
# Изготовления ПАС в виде блоков



Сущность второго способа получения такой ПАС заключается в том, что в предварительно изготовленную по форме внутреннего профиля изделия подложку из углерод-углеродного войлочного материала вставляются жесткие углеродные стержни. В пространство между стержнями наматывают углеродные волокна вдоль образующей и по спиральной траектории до необходимой толщины. Подложка удаляется на промежуточных стадиях получения УУКМ, когда ПАС приобретает достаточную жесткость.

Совершенствованием этого способа изготовления ПАС является переход от трехмерной к четырехмерной схеме армирования.

Технологическая схема аксиально-радиально-окружной намотки

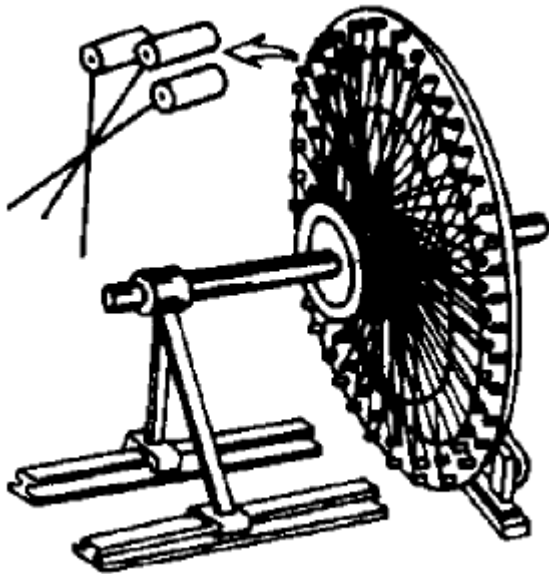




# Изготовления ПАС в виде блоков



Машины для плетения ПАС созданы на базе стандартного текстильного оборудования. Особенность процесса заключается в том, что на специальной плетельной машине переплетается ЭПАС трех направлений. Образованное переплетение укладывается на поверхность оправки коаксиальными слоями между предварительно установленными радиальными стержнями со строгим соблюдением заранее заданных направлений армирования (рисунок).



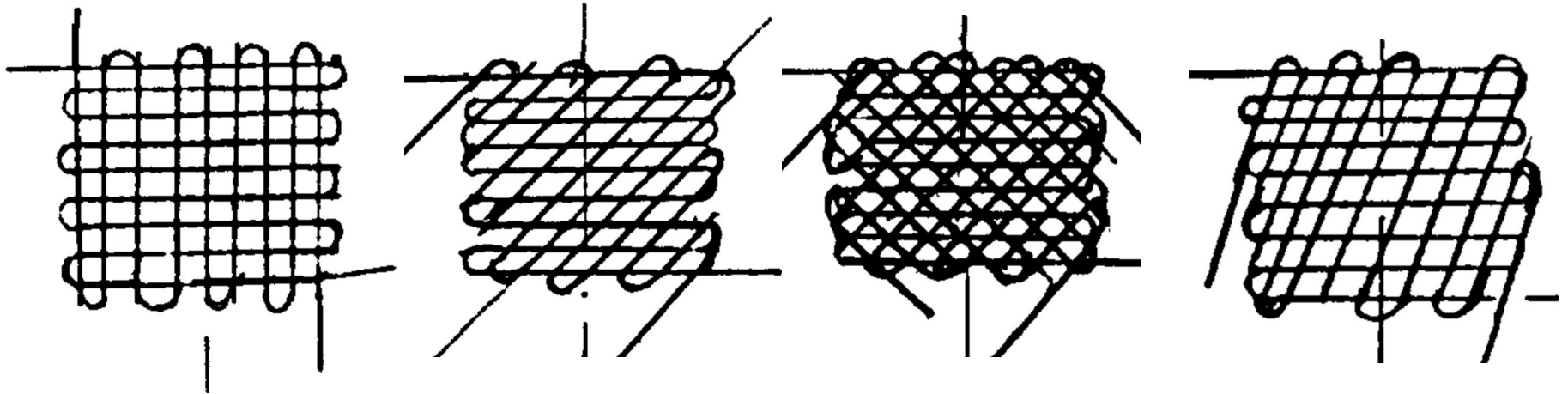
← Технологическая схема аксиально-радиально-спиральной намотки



# Изготовления ПАС в виде блоков



Для получения ПАС прошивкой слои углеродной ткани выкладывают на оправку, копируя внутренний профиль изделия. После набора требуемой толщины прошивают пакет слоев углеродной швейной нитью. Прошивку осуществляют на швейной машине челночного типа или на машине с односторонней прошивкой с помощью кривой иглы.





# Заключение



В результате данной лекции были рассмотрены следующие понятия:

- 1) рассмотрены и объяснены основные технологические процессы изготовления конструкций из металлокомпозитов, оценены их достоинства и недостатки;
- 2) рассмотрена физическая сущность жидкофазных, твердофазных и газофазных процессов, составляющих основу технологии получения металлокомпозитных деталей и покрытий;
- 3) рассмотрены основные технологические методы получения пространственных армирующих структур из углеродных материалов.



# Контактная информация

---



E-mail: [kartashov@bmstu.ru](mailto:kartashov@bmstu.ru)  
Рабочий телефон : 18-09  
Мобильный телефон: +7(926)275-0886

Спасибо за внимание!