

ЛИТЕРАТУРА

1. Глезер, А.М. Структура и механические свойства аморфных сплавов / А.М. Глезер, Б.В. Молотилов. – М.: Металлургия, 1992. – 208 с.
2. Верещагин, М.Н. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа: монография / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2004. – 134 с.
3. Верещагин, М.Н. Особенности пластической деформации при indentировании пирамидой Виккерса поверхности аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Физика металлов и металловедение. – 2002. – Т. 93. – №5. – С. 101–104.
4. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

УДК 539

Дикан Ж.Г., Ларченков Л.В.

МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРУКТУР

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Как наука механика композиционных структур (материалов) зародилась сравнительно недавно, хотя идея использования композиций структурных элементов металлов, керамики, стекла, полимеров и т.д. для получения структур с уникальными свойствами известна давно. Сама природа использовала принцип такой комбинации, например, костей (хрупкая структура апатит – минерал из группы фосфорнокислых соединений кальция, содержащий переменное количество фтора и хлора, – связанный прочным мягким белковым веществом) и древесины (волокна целлюлозы, обеспечивающие механическую прочность и эластичность растительных тканей, связанные лигнином, обеспечивающим одревеснение клеток целлюлозы, увеличивая их прочность). В настоящее время широко применяются следующие структуры: железобетон, прозрачный бетон, стеклопластик, биметаллы, графито- и борозпоксиды.

Важным преимуществом композиционной структуры является её высокая прочность на единицу массы. При этом по своим прочностным и тепловым качествам многие композиционные структуры превосходят любой из своих структурных элементов или резко отличаются от него.

Наряду с многими технически важными преимуществами композиционные структуры обладают также недостатками, которые связаны с тем, что физико-механические и химические свойства компонентов структур оказываются не согласованными, а это приводит к специфическим видам разрушения (расслоение, местные разрывы, когезии и т.п.). В связи с этим, при создании математических моделей различных структур эти особенности порождают большие трудности, которые остаются ещё неизученными.

Композиционную структуру можно рассматривать как неоднородную среду. К таким структурам относятся поликристаллические Среды и многоэлементные стохастические смеси (когда все структурные элементы смеси равноправны), а также матричные смеси (когда в композиционной структуре выделяется матрица, а все остальные компоненты считаются включениями). Сюда можно отнести и однородные структуры с пустотами (последние трактуются как включения с равными нулю модулями упругости). Выбор метода описания такой неоднородной Среды зависит от формы и взаимного расположения структурных элементов. Очень часто в пространственном распределении неоднородностей имеется определённый порядок, и тогда говорят о регулярных структурах; если имеются небольшие нарушения этого порядка, то структуры называют квазирегулярными. Каждый из структурных элементов неоднородной структуры может обладать различными механическими характеристиками: упругими, вязкоупругими, пластическими и др. Описание таких неоднородных структур связано с большими математическими трудностями.

До недавнего времени основное содержание работ по механике композиционных структур состояло в сведении задачи неоднородной (чаще всего изотропной) теории упругости к задаче однородной анизотропной теории. Это достигалось введением различных модулей, которые либо вычислялись различными методами (стахостическими или детерминированными), либо определялись экспериментально как средние модули структуры в целом [1, 2, 3, 4].

В данном случае композиционные структуры – это металлические или неметаллические матрицы (основы) с заданным расположением в них упрочнителей (волокон, дисперсных частиц и др.), при этом эффективно используются индивидуальные свойства структурных элементов композиции.

По характеру композиционные структуры подразделяются на :

- волокнистые, упрочнённые непрерывными волокнами и нитевидными кристаллами;
- дисперсноупрочнённые структуры, полученные путём введения в металлическую матрицу дисперсных частиц упрочнителей;
- слоистые структуры, созданные путём прессования, прокатки или сварки взрывом разнородных материалов.

Структуру следует понимать как строение какого-либо материала с определёнными устойчивыми взаимосвязями, его составляющих структурных элементов, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе, то есть сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях [5, 6, 7].

По характеру структуры (в нашем понимании, например, сплав в твёрдом или жидком состоянии) строение металла можно наблюдать невооружённым глазом или при небольшом увеличении.

Различают макро- и микроструктуру материалов. В разрезе металлического образца можно наблюдать присутствие и распределение в его объёме раковин, пор, неметаллических включений, дефектов, а также расположение и форму крупных зёрен.

Комбинируя в расплавах объёмное содержание компонентов, можно, в зависимости от назначения, получать структуры с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

Волокнистые композиционные структуры, армированные нитевидными кристаллами и непрерывными волокнами тугоплавких соединений и структурных элементов (SiC, Al₂O₃, бор, углерод и др.), являются новым классом материалов.

Виды и применение композиционных структур.

Принципы упрочнения известны в технике с глубокой древности. Ещё в Вавилоне использовали тростник для армирования глины при постройке жилищ, а в Древней Греции железными прутьями укрепляли мраморные колонны при постройке дворцов и храмов. В 1555–1560 годах при постройке Храма Василия Блаженного в Москве русские зодчие Барма и Постник использовали армированные железными полосами каменные плиты. Прообразом двойных композиционных структур является широко известный железобетон, представляющий собой сочетание бетона, работающего на сжатие, и стальной арматуры, работающей на растяжение, а также полученные в 19 веке прокаткой слоистые материалы. Армирование можно производить таким методом. Армирование можно производить таким методом, как сварка взрывом, соединяющим различные по прочностным свойствам структуры по всей площади отдельных элементов независимо от их механических характеристик.

Развитию современных композиционных структур содействовали: разработка и применение в конструкциях волокнистых стеклопластиков, обладающих высокой удельной прочностью (1940-1950 годы); открытие весьма высокой прочности, приближающейся к теоретически возможной, нитевидных кристаллов и доказательства возможности использования их для упрочнения металлических и неметаллических структур (1950-1960 годы); разработка новых армированных материалов - высокопрочных и высокомодульных непрерывных волокон бора, углерода, карбидов кремния (SiC) и алюминия (Al₄C₃) и волокон других неорганических тугоплавких соединений, а также упрочнителей на основе металлов (1960-1970 годы).

В технике широкое распространение получили волокнистые композиционные структуры, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами, в кото-

рых армирующие структурные элементы несут основную нагрузку, тогда как матрица передаёт напряжение волокнам. Волокнистые композиционные структуры анизотропные. Механические свойства их представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические свойства композиционных структур

Матрица	Упрочнитель (волокно)		Плотность, кг/м ³	Прежель-прочность Гн/м ²	Удельная прочность кн м/кг	Модуль упругости Гн/м ²	Удельн.модуль упруг. Мн/м ²
	Материал	% (объём)					
Никель	Вольфрам	40	12500	0,8	64	265	21,2
	Молибден	50	9300	0,7	75	235	12,25
Титан	Карбон.кремн	25	4000	0,9	227	210	52
Алюмини	Борное волок.	45	2600	1,1	420	240	100
	Сталь, провол.	25	4200	1,2	280	105	23,4
Магний	Борное волок.	40	2000	1,0	500	220	110
Полимерн. связующее	Углерод. волок.	50	1600	1,18	737	168	105
	Борное волокн	60	1900	1,4	736	260	136,8

Диаметр непрерывных волокон углерода, бора, тугоплавких соединений (B₄C₃, SiC и др.) обычно составляет 100 - 150 мкм. Волокнистые композиционные структуры, в отличие от монолитных сплавов, обладают высокой усталостной прочностью σ_{-1} . Так, например, σ_{-1} (база 10⁷ циклов) алюминиевых сплавов составляет 130–150 Мн/м² (130–150 МПа), в то время как у армированного борным волокном алюминиевой композиционной структуры σ_{-1} около 500 МПа при той же базе. Предел прочности σ_B и модуль упругости E композиционной структуры на основе алюминия, армированного борным волокном, примерно в 2 раза больше, чем алюминиевых сплавов В-95 и АК4-1.

Механические свойства композиционных структур определяются не только свойствами самих волокон (таблица 2), но и их ориентацией, объёмным содержанием, способностью матрицы передавать волокнам приложенную нагрузку и др.

Таблица 2 – Свойства нитевидных кристаллов и непрерывных волокон

Упрочнитель	Температ. плавл, °С	Плотность кг/м ³	Предел прочности, Гн/м ²	Удельная прочность, Мн · м/кг	Модуль упругости, Гн/м ²	Удельн.модуль упруг. Мн · м/кг
Непрерывные волокна						
Al ₂ O ₃	2050	3960	2,1	0,53	450	113
B	2160	2630	3,5	1,33	420	160
C	3650	1700	2,5	1,47	250-400	147-235
B ₄ C	2450	2360	2,3	0,98	490	208
SiC	2650	3900	2,5	0,64	480	123
W	3400	19400	4,2	0,22	410	21
Mo	2620	10200	2,2	0,21	360	35
Be	1285	1850	1,5	0,81	240	130
Нитевидные кристаллы						
Al ₂ O ₃	2050	3960	28 [#]	7,1	500	126
AlN	2400	3300	15 [#]	4,55	380	115
B ₄ C	2450	2520	14 [#]	5,55	480	190
SiC	2650	3210	27 [#]	8,4	580	180
Si ₃ N ₄	1900	3180	15 [#]	4,72	495	155
C	3650	1700	21 [#]	12,35	700	410

Примечание [#] -- максимальные значения

Важнейшими технологическими методами изготовления композиционных структур (материалов) являются:

- пропитка армированных волокон матричным материалом;
- формование в просфоре лент упрочнителя и матрицы, полученных намоткой;
- холодное прессование обоих компонентов с последующим спеканием;
- электрохимическое нанесение покрытий на волокна с последующим прессованием;
- осождение матрицы плазменным напылением на упрочнитель с последующим обжатием;
- пакетная диффузионная сварка многослойных лент структурных элементов;
- совместная прокатка армирующих элементов с матрицей и др.

В узлах конструкций, требующих наибольшего упрочнения, армирующие волокна располагаются по направлению приложенной нагрузки. Цилиндрические тела и другие изделия вращения (например, сосуды высокого давления) армируют волокнами, ориентируя их в продольном и поперечном направлениях.

Увеличение прочности и надёжности в работе цилиндрических корпусов, а также уменьшение их массы достигается внешним армированием конструкций высокопрочными и высокомодульными волокнами, что позволяет повысить в 1,4–2,0 раза удельную конструктивную прочность по сравнению с цельнометаллическими корпусами.

Упрочнение структур волокнами из тугоплавких веществ значительно повышает их жаропрочность. Например, армирование никелевого сплава вольфрамовым волокном (проволокой) позволяет повысить его жаропрочность при 1100°С в два раза.

Весьма перспективны композиционные структуры, армированные нитевидными кристаллами (усаами) керамических, полимерных и других структур. Размеры усов обычно составляют от долей до нескольких микрометров по диаметру и примерно 10–15 мм по длине.

Делаются композиционные структуры со специальными свойствами, например, радиопрозрачные и радиопоглощающие структуры, прозрачные бетоны, пропускающие свет во внутрь помещений, структуры для тепловой для тепловой защиты космических аппаратов с малым коэффициентом линейного термического расширения и высоким удельным модулем упругости и другие.

Свойства композиционных структур на основе алюминия (прочность, модуль упругости и длительная прочность) более чем в 2 раза (до 500°С) выше, чем у обычных сплавов.

Композиционные структуры с никелевой и кобальтовой матрицами увеличивают уровень рабочих температур от 1000 до 1200°С, а на основе тугоплавких металлов и соединений — до 1500–2000°С.

Повышение прочностных и упругих свойств структур позволяет существенно облегчить конструкции, а увеличение рабочих температур этих структур даёт возможность повысить мощность двигателей внутреннего сгорания, тепловых котлов и других агрегатов.

Области применения композиционных структур многочисленны. Начиная с авиационно-космической, ракетной и другой специальной техники, они могут быть успешно применены в энергетическом турбостроении, в автомобильной промышленности (детали двигателей и кузовов машин), в машиностроении (корпуса и детали станков, кузнечно-прессовое оборудование), в горной промышленности (буровой инструмент, буровые машины), в металлургической промышленности (огнеупорные материалы для футеровки печей, кожуха, наконечники термпар), в строительстве (пролёты мостов, опоры мостовых ферм, панели для высотных сборных сооружений), в химической промышленности (автоклавы, цистерны, аппараты для кислот, ёмкости для перевозки нефтепродуктов и кислот), в текстильной промышленности (детали прядильных машин, ткацких станков), в сельскохозяйственном машиностроении (лемеха, отвалы плугов, сошники сеялок, корпуса и стойки для тяжёлых условий работы), в бытовой технике (детали стиральных машин и холодильников, рамы спортивных велосипедов, мотоциклов, детали радиоаппаратуры).

Спрос на композиционные структуры ежегодно растёт, что требует создания новых методов изготовления деталей и изменения принципов расчётов и конструирования техники [10, 11, 15, 17].

Строение двойных металлических систем.

В самых первых исследованиях систем Fe - C (железо - углерод) было установлено, что в диаграмме состояния железо - углеродистых сплавов в качестве богатой углеродом составляющей может присутствовать графит или химическое соединение Fe_3C (6,67% C). Это соединение известно как “цементит”, который присутствует в структуре даже медленно охлаждённых сплавов, и разложение его на железо и графит требуется длительная выдержка при повышенных температурах. В диаграмме состояния, о которых пойдёт речь ниже, где составляющая представлена углеродом, присутствует в некотором количестве цементит. Такое состояние сплава даёт право называть диаграмму метастабильного равновесия в отличие от равномерной диаграмму железо—графит.

Существование метастабильной системы “железо — цементит” наряду со стабильной системой “железо—графит” обусловлено возникновением двумерных и трёхмерных зародышей цементита, а также линейной скоростью их роста при определённой температуре для всех составов оказывается существенно большей, чем скорость возникновения и роста соответствующих графитных зародышей. Метастабильная система Fe — Fe_3C объясняется трудностью самодиффузии атомов железа. Диаграмма состояния железоуглеродистого сплава представлена на рис 1. По горизонтальной линии (линия абсцисс) отложены атомные проценты (в некоторых источниках даются весовые проценты и методика пересчёта их в атомные проценты), а по оси ординат — температура [8].

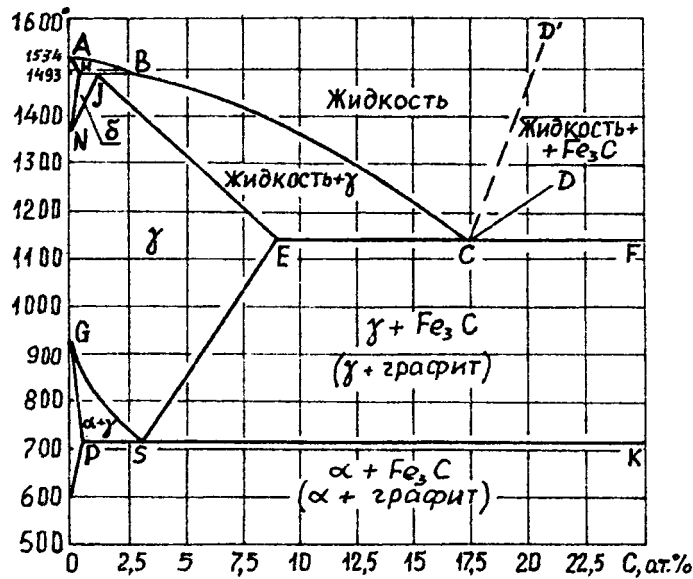


Рис. 1. Диаграмма сплава углерод-железо в ат.%

Здесь мы представляем лишь простейшие изобарические (при давлении 1 атм) диаграммы состояния двойных систем, в которых существуют только жидкие фазы L и твёрдые S.

Жидкость, состав которой отвечает точке E, затвердевает при постоянной температуре в тонкую смесь кристаллов A и C. Из жидкостей, состав которых лежит между A и C, при охлаждении начинают выпадать кристаллы γ (графит), вследствие чего содержание B ($\gamma + Fe_3C$) в жидкости увеличивается; когда её состав будет отвечать точке C, процесс закончится кристаллизацией эвтектики.

Точно так же происходит затверждение жидкостей (железо — углерод), состав которых лежит между C и D, начинается выпадением кристаллов Fe_3C и заканчивается кристаллизацией эвтектики. Прямая ECF линией солидуса (геометрическое место температур конца кристаллизации). Температура эвтектической горизонтали ECF — 1147°C для расплава $\gamma \leftrightarrow Fe_3C$ и 17,28 ат.%C.

При современном уровне развития металловедения диаграммы состояния должны представляться в атомных процентах. Приведенная диаграмма состояния является бинарной или

двухкомпонентной системой (рис. 2). В практике системы могут быть трёх-, четырёхкомпонентными.

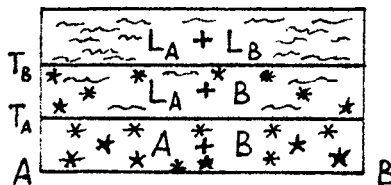


Рис. 2. Диаграмма состояния температур плавления компонентов А и В

Двойные системы – это физико-механические системы, состоящие из двух независимых частей (компонентов). Особое практическое значение имеют конденсированные двойные системы, то есть не содержащие газов или паров.

О двойниковых системах, состоящих только из жидких фаз или жидкости и газа (пара), рассказывается в разделе “жидкие смеси”; о двойниковых системах из твёрдых фаз и газа (пара) — в “термодинамической системе”.

Если взаимная растворимость компонентов А и В в жидком и твёрдом состоянии отсутствуют, то диаграмма состояния изображается двумя горизонтальными прямыми, проведенными через точки T_A и T_B , отвечающие температурам плавления компонентов А и В. Выше точки T_B система состоит из двух жидких фаз L_A и L_B ; между T_B и T_A — из жидкой L_A и кристаллов В; ниже T_A — из смеси кристаллов А и В. Если взаимная растворимость А и В (в нашем случае А соответствует железу Fe, а В - углероду С, рис. 1) в жидком состоянии не ограничена, а в твёрдом ограничена, то в случае образования эвтектики последняя состоит из смеси двух твёрдых растворов α и Fe_3C , предельные концентрации которых отвечают точкам Е и С при эвтектической температуре и точке S при комнатной [9, 10, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников Н.Ф. “Структура и симметрия”. Ежегодник. - 1969. - 208 с. 2. Блауберг И.В. и др. Становление и сущность системного подхода. - М. - 1973. - 170 с. 3. Аносов В.Я. Основные начала физико-химического анализа. - М. - 1976. - 503 с. 4. Курнаков Н.С. Избранные труды. Металловедение. Т.2. - М. - 1961. - 611 с. 5. Гиббс Дж. Термодинамические работы. - М.-Л. - 1950. - 492 с. 6. Дервинг В.П. и др. Правило фаз с изложением основ термодинамики. - М. - 1964. - 455 с. 7. Туманов А.Т. “Металловедение и термическая обработка металлов”, №4. - 1972. - с.24. 8. Современные композиционные материалы. Пер. с англ. - М. - 1970. - 672 с. 9. Юм-Розери В., Рейнор Г.В. Структура металлов и сплавов. Пер. с англ. - М. - 1959. - 391 с. 10. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Т.1-2. - М. - 1962. - 982с. 11. Шоршов М.Х. и др. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей. - М. - 1981. - 268 с.

УДК 621.1; 621,7.

Зубко С.А.

РОСТ ТРЕЩИНЫ В ВЕРШИНЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА РАЗРЫВ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Как было показано в работе [1], в процессе испытаний стального образца на разрыв, в вершине растущей трещины в стальном образце был установлен и показан методом голографии-