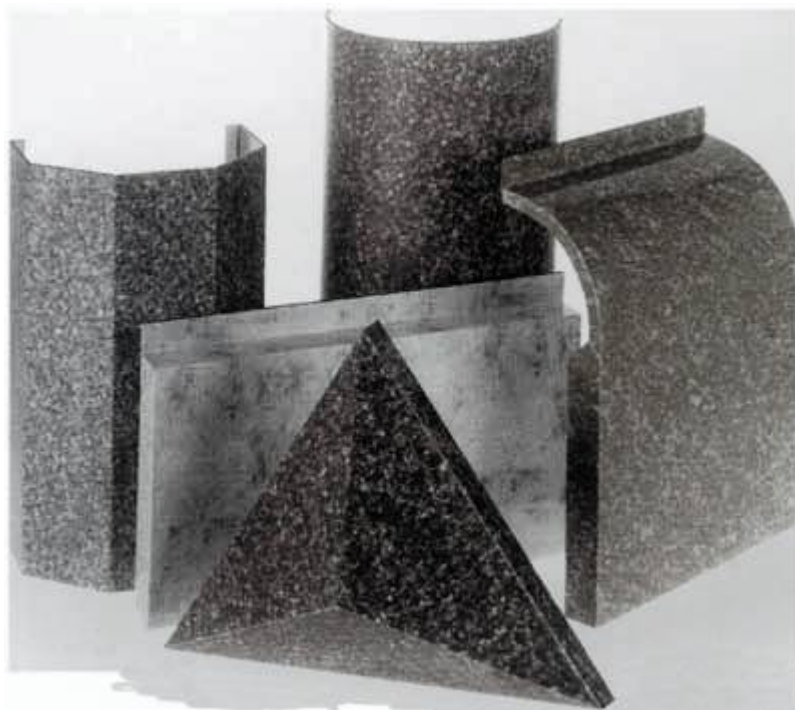


КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Методические указания
к лабораторной работе по дисциплинам
«Материаловедение», «Материаловедение. Технология
конструкционных материалов», «Технология
автомобиле - тракторостроения», «Конструкторско-
технологические решения для обеспечения
безопасности проектируемых и эксплуатируемых
объектов»**



Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Сибирская государственная автомобильно-дорожная
академия (СибАДИ)»

Кафедра «Конструкционные материалы и специальные технологии»

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Методические указания
к лабораторной работе по дисциплинам
«Материаловедение», «Материаловедение. Технология
конструкционных материалов», «Технология автомобиле-
тракторостроения», «Конструкторско-технологические
решения для обеспечения безопасности проектируемых и
эксплуатируемых объектов»

Составители В.В. Евстифеев, В.И. Матюхин, В.В.Акимов
(в авторской редакции)

Омск
СибАДИ
2012

УДК 621.785.
ББК 34.651

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф «ЭиРА» В.И. Гурдин.

Методические указания к лабораторной работе по дисциплинам «Материаловедение», «Материаловедение. Технология конструкционных материалов», «Технология автомобиле – тракторостроения», «Конструкторско-технологические решения для обеспечения безопасности проектируемых и эксплуатируемых объектов», подготовленные в соответствии с требованиями ФГОС ВПО направлений подготовки и специальностей 080200.62, 141100.62, 190100.62, 190109.65, 190700.62, 220700.62, 221400.62, 280700.62.

Композиционные материалы в машиностроении: Методические указания к лабораторной работе по дисциплинам «Материаловедение», «Материаловедение. Технология конструкционных материалов», «Технология автомобиле - и тракторостроения», «Конструкторско-технологические решения для обеспечения безопасности проектируемых и эксплуатируемых объектов» для студентов очной и заочной форм обучения / Сост. В.В. Евстифеев, В.И. Матюхин, В.В.Акимов – Омск: СибАДИ, 2012. – 16 с.

Рассмотрены классификация композиционных материалов, механизм их упрочнения, свойства и область применения. Приведена методика расчета их удельной прочности.

Табл. 8. Ил. 4. Библиограф.: 4 назв.

© Составители: В.В. Евстифеев, В.И. Матюхин, В.В.Акимов

Цель работы: изучить особенности формирования композиционных материалов, механизмы их упрочнения, расчет некоторых параметров.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Работоспособность динамических конструкций (аэрокосмические, энергетические, строительные и др.) может быть повышена за счет использования конструкционных материалов, обладающих уникальными свойствами. Такими материалами являются *композиционные материалы* (композиты, КМ), которые состоят из двух и более разнородных по химическому составу и структуре компонентов, определенным образом распределенных по объему детали (изделия). Это дает возможность конструировать материалы с заданными свойствами.

По прочности, сопротивлению тепловому воздействию и особенно по надежности композиционные материалы превосходят любой из своих компонентов в отдельности (табл. 1). Они обладают свойствами, не присущими индивидуальным компонентам. Композиционные материалы имеют более высокие значения временного сопротивления и предела выносливости (на 50-100% больше, чем у обычных сплавов); у них более высокий модуль упругости и удельная прочность; они обладают пониженной склонностью к трещинообразованию. Применение композиционных материалов повышает жесткость конструкций при одновременном снижении их материалоемкости.

Таблица 1

Значения механических свойств волокнистых композитов

| Композиция | Временное сопротивление, МПа | Предел выносливости, МПа | Модуль упругости, МПа |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Магний-бор (ВКМ-1) | 1300 | 500 | 220 |
| Алюминий-углерод (ВКУ1) | 900 | 300 | 220 |
| Алюминий-сталь (КАС-1А) | 1700 | 350 | 110 |

Для композиционных конструкционных материалов характерно то, что состав, форма и свойства компонентов материала определены заранее, а компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала.

Все композиционные материалы состоят из матрицы и наполнителей.

Матрицей называют компонент, который связывает разнородные материалы, позволяет изготовить изделие необходимой формы, воспринимает и перераспределяет нагрузки на наполнитель от внешних нагрузок, прикладываемых к несущему упрочняющему компоненту. Прочностные характеристики материала матрицы являются определяющими при сдвиговых нагрузках, при нагружении композита в направлениях, отличных от ориентации волокон, а также при циклическом нагружении. Поэтому материал матрицы должен быть пластичным и обладать высокой прочностью контактного взаимодействия (адгезионной прочностью) с поверхностью наполнителя.

Материал матрицы определяет также уровень рабочих температур системы, работоспособность во влажной среде, облучениях и при других воздействиях внешней среды. От матрицы зависят и теплофизические, электрические и другие свойства композита.

Композиционные материалы разрабатываются с **металлической или неметаллической матрицей.**

В качестве металлической матрицы используют алюминий, магний, медь, железо, никель, вольфрам, кобальт, титан и различные сплавы. Неметаллические матрицы: полимерные (эпоксидные, фенолформальдегидные, полиамидные и др.), углеродные и керамические материалы, глины, цемент.

Наполнители, распределенные в связующем, оказывают определяющее влияние на свойства композита. Они являются разделенным компонентом и играют усиливающую или армирующую роль.

В качестве наполнителя, как правило, используют более прочное вещество: металлы компактные, порошковые и чешуйчатые, ткани из различных материалов, картон, бумага, древесная мука, волокна асбеста, очесы хлопка и льна, солома, волокна растений, графит, тальк, технический углерод, силикаты, кварц, стекло, полимеры, нитевидные кристаллы и усы. Наполнитель может быть порошковым, волокнистым, пластинчатым.

В зависимости от характера взаимодействия с материалом матрицы наполнители подразделяют на **инертные** и **активные** (упрочняющие). Механизм взаимодействия матрицы с наполнителем определяется химической природой этих материалов и состоянием поверхности наполнителя. Наибольший эффект усиления достигается при возникновении между наполнителем и материалом матрицы химических связей или значительного адгезионного взаимодействия. Наполнители, способные к такому взаимодействию с матрицей, называются активными. Инертными называются наполнители, не способные к этому взаимодействию. Последние применяют для облегчения переработки или снижения стоимости изделий.

Композиционные материалы можно классифицировать следующим образом:

1. По составу матриц и наполнителей.

На практике широко используются **полиматричные композиты** с комбинированными матрицами, состоящими из чередующихся слоев (двух или более) различного химического состава (рис. 1а) и **полиармированные композиты** с несколькими типами наполнителей, которые дополняют свойства друг друга (рис. 1б).

2. По форме наполнителей.

Свойства композиционного материала существенно зависят от формы наполнителя. Наполнители разделяют на три основные группы: - **нуль-мерные (зернистые)** (рис. 2а), с помощью которых получают **дисперсно-упрочненные композиты**; - **одномерные** (рис. 2б), которые используют для создания **волоконистых композитов**; - **двумерные** (рис. 2в, г, д), используемые при получении **слоистых композитов**; - **с трехмерным (объемным) армированием**.

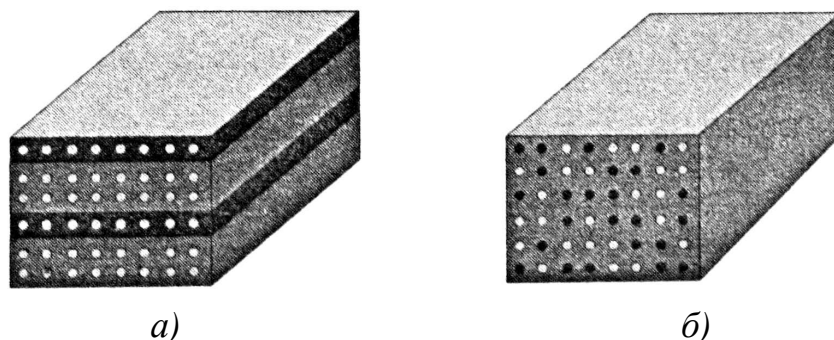


Рис. 1. Структурные схемы композитов: *а* – полиматричных; *б* – полиармированных

3. По схеме армирования.

Композиционные материалы могут армироваться:

- **нуль - мерными (зернистыми) наполнителями** (армирование древесной мукой, графитом, слюдой, гравием, асбестом и др.);

- **нуль - и одномерными наполнителями** одновременно (хаотичное армирование, например, железобетона);

- **одномерными наполнителями** (одномерное армирование, например, непрерывными или прерывистыми борными, стеклянными или углеродными волокнами лент, пластин, листов);

- **двумерными наполнителями** (армирование волокнами, которые образуют чередующиеся перпендикулярные слои; использование тканевых слоев; использование сплошных слоев из бумаги, картона, шпона);

-пространственными наполнителями (армирование
однонаправленными непрерывными волокнами,
образующими пространственно разделенные перпендикулярные слои).

4. По структуре системы «матрица – наполнитель».

Применяются различные сочетания матриц и наполнителя:

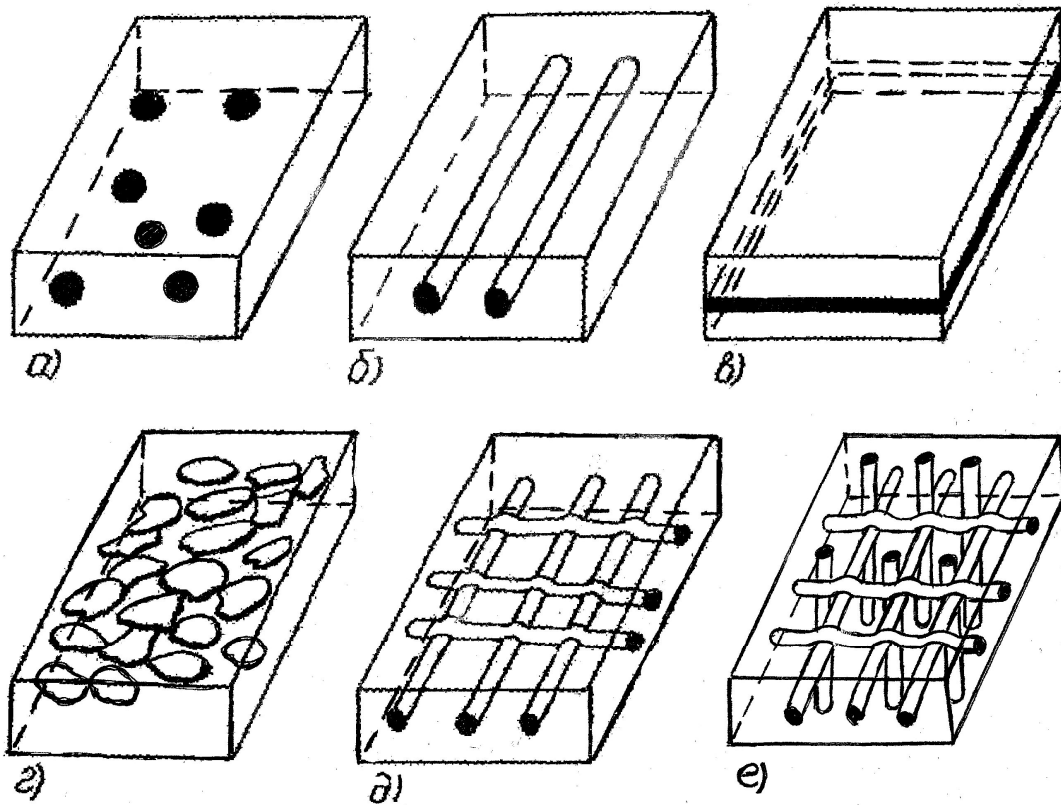


Рис. 2. Классификация наполнителей по форме: *а* – нуль-мерные (зернистые);
б – одномерные; *в, г, д* – двумерные; *е* – трехмерные

- **неметаллическая матрица – неметаллический наполнитель** (бетон, состоящий из цементного раствора и смеси песка и щебня; глина, смешанная с соломой; пластмасса, упрочненная нитевидными кристаллами из Al_2O_3 , BeO , B_4C , SiC , Si_2N_4 , углерода, волокнами конопли или абаки, нитями льна, бумагой, тканями и др.);

- **неметаллическая матрица – металлический наполнитель** (железобетон; пластики, армированные волокнами или чешуйками из металлов и др.);

- **металлическая матрица – неметаллический наполнитель** (антифрикционные и фрикционные материалы на основе бронз или железа с добавками определенных веществ (графит, дисульфит молибдена, сера); композиты с керамическими наполнителями (карбиды, оксиды, нитриды, бориды);

- **металлическая матрица – металлический наполнитель** (двух- и многослойные плакированные листы; металлы, армированные волокнами или тонкодисперсными тугоплавкими частицами, не растворяющимися в основном металле (алюминий, титан, магний, никель или сплавы на их основе).

Наполнители (упрочнители) равномерно распределяются в матрице. Они должны обладать высокой прочностью, твердостью, модулем упругости и по этим свойствам превосходить матрицу.

По геометрической форме наполнителя композиционные материалы (КМ) делят:

- с зернистым наполнителем, если

$l_3/d \approx 1$, где l_3 – межзеренное расстояние, d – размер зерна;

- с волокнистым наполнителем, если

$l_i/d \gg 1$, где l_i – длина волокна.

Из-за низкого коэффициента диффузии, переходного слоя между компонентами (матрицей и наполнителями) нет. Связь между волокнами и матрицей обеспечивается только за счет адгезии (молекулярного взаимодействия). Для обеспечения высокой прочности связи между компонентами необходимо полное смачивание волокон. Это достигается повышением поверхностной энергии волокон их травлением, окислением, а также введением в структуру ионов металлов, которые усиливают взаимосвязь между полимерными молекулами.

2. МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1 Механизм упрочнения КМ с зернистым наполнителем

В таких КМ несущим компонентом является матрица. Роль упрочнителя (зернистого наполнителя) – механическое препятствование распространению трещины, которая может появиться в матрице. Способность зерен задерживать распространение трещины пропорциональна их прочности. Прочность самого зерна, зависит от количества дефектов, по которым происходит его разрушение. Чем мельче наполнитель, тем меньше в нем дефектов, тем выше прочность. Поэтому на практике предпочитают армирование КМ мелкозернистым наполнителем.

КМ, матрица которых упрочнена зёрнами размером менее 0,1 мкм называют дисперсно-упрочненными.

Степень упрочнения матрицы КМ пропорциональна в этом случае сопротивлению, которое оказывают зёрна движению дислокаций. Причем, каждая последующая дислокация при движении взаимодействует уже не с

зерном, а с дислокационной петлей, образующейся вокруг зерна и оказывающей большее сопротивление (рис.3). Происходит деформационное упрочнение КМ.

Если матрица армируется крупнозернистыми наполнителями (размер зерна более 1 мкм) их упрочняющее действие на матрицу проявляется при объемном содержании зерен более 25%. Матрица упрочняется за счет того, что жесткая поверхность зерен наполнителя ограничивает деформацию более мягкой матрицы под действием нагрузки.

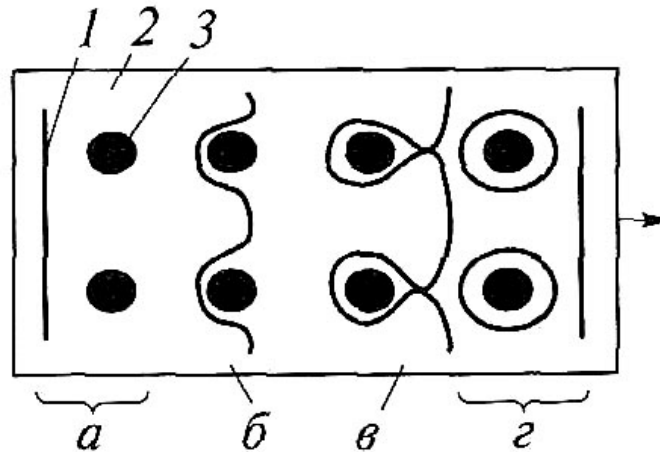


Рис. 3. Схема торможения пластической деформации зернами наполнителя

2.2 Механизм упрочнения КМ с волокнистыми наполнителями

Растягивающие нагрузки, приложенные к КМ с волокнистыми упрочнителями, передается на волокна через матрицу. Наводятся касательные напряжения на поверхностях раздела волокон и матрицы. Разрушение такого КМ происходит путем «вытягивания» волокна из матрицы по мере развития микротрещины разрушения.

Предельная величина касательных напряжений зависит от адгезионной прочности контакта волокна и матрицы. В случае потери контакта в основном волокна сопротивляются растяжению конструкции.

Для КМ с однонаправленными волокнами его прочность определяют по следующему уравнению

$$S_k = S^v \cdot V^v + S^m (1 - V^v), \quad (1)$$

где σ^v - прочность волокна, МПа; V^v - объемная доля волокон в КМ; σ^m - прочность матрицы, МПа.

В реальных КМ максимальное значение V^v редко превышает 60%. Снижение прочности КМ при дальнейшем увеличении V^v объясняется недостатком матричной фазы для обеспечения равномерного перераспределения рабочей нагрузки между матрицей и волокнами.

Прочность КМ с волокнистым наполнителем определяется характером его разрушения. После разрыва первого волокна в структуре КМ деталь остается не разрушенной и продолжает выполнять свои функции. Нагрузка через матрицу перераспределяется между оставшимися целыми волокнами и частями разрушенного волокна. При дальнейшем нагружении детали волокна будут дробиться на отрезки меньшей длины. Разрушенные волокна будут воспринимать нагрузку как дискретные волокна, пока их длина не станет меньше критической. Последние начнут, не разрушаясь «вытягиваться» из матрицы (рис. 4).

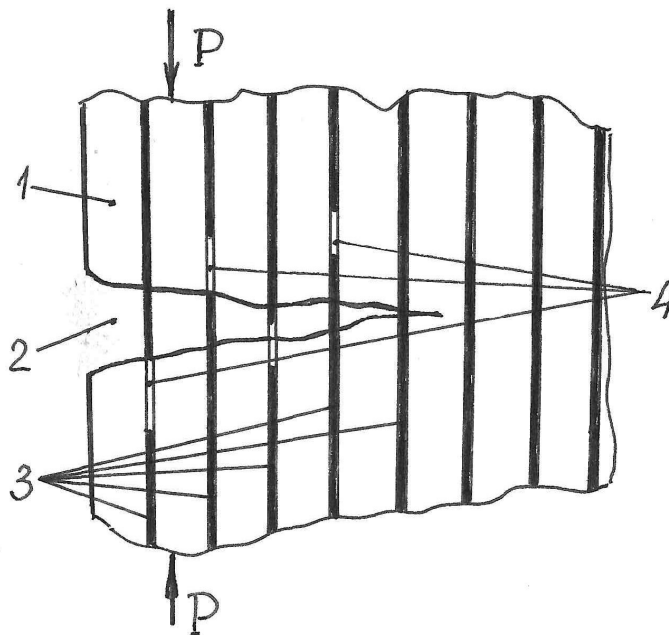


Рис. 4. Схема разрушения КМ с волокнистым наполнителем: 1 – матрица; 2 - трещина; 3 - волокна; 4 – зона разрушения волокна; P - растягивающая нагрузка

Прочность КМ будет определяться прочностью адгезионного контакта на границе волокна – матрица.

3. НАЗНАЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКОВЫХ, ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ И ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Порошковые КМ

Технологию получения порошковых КМ называют порошковой металлургией. Изделия получают путем холодного или горячего прессования смеси порошков матрицы и наполнителей с последующим

спеканием полученного полуфабриката в инертной среде, часто с жидкофазной пропиткой. Таким способом производят керметы (твердые сплавы ВК, ТК, ТТК и др.) для режущего и штампового инструмента; антифрикционные материалы, которые обеспечивают низкий коэффициент трения и иногда работают без смазки при высокой износостойкости трущейся пары (пористое железо, пропитанное смазкой; железо-графит; железо-медь-графит; сульфидированные железографитовые материалы; материалы с присадками в качестве твердых смазок фторидов кальция или бария; пористые материалы пропитанные свинцом или легкоплавкими сплавами на основе меди, олова, свинца и других присадок); фрикционные материалы (наполнитель асбест, карбиды бора и кремния); магнитные композиционные материалы (магнитотвердые и магнитомягкие).

3.2 Дисперсно-упрочненные КМ

Характерным для дисперсно-упрочненных материалов (ДМ) является упрочнение металлической матрицы тонкими включениями частиц тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов и т.п.). При нагружении таких материалов матрица несет основную нагрузку, а дисперсные частицы действуют как препятствия, задерживающие перемещение дислокаций. Дисперсные включения формируют путем создания условий для контролируемого химического взаимодействия матричного или введенного в матрицу элемента с активными газами (O_2 , N_2). К дисперсно-упрочненным относятся, например, САП - спеченный алюминиевый порошок (с 7, 10 или 13 % Al_2O_3), который обеспечивает при введении в алюминиевую матрицу высокую жаропрочность (до $500^\circ C$), что позволяет использовать КМ в двигателестроении, химическом машиностроении, атомной энергетике; ситаллы – КМ со стеклянной матрицей, в которых при кристаллизации образуются кристаллы размером 0,01 - 1 мкм, что дает высокую прочность (до 220 МПа), жаропрочность, термическую стойкость, оптическую прозрачность, низкий коэффициент линейного расширения.

3.3 Волокнистые КМ

Характерным для волокнистых материалов (ДМ) является упрочнение неметаллической или металлической матрицы волокнами естественных (асбест, базальт, волластонит, абака, конопля и др.) или искусственных материалов (металлические (табл. 2), стеклянные, полимерные, углеродные, борные, корундовые, карборундовые волокна) различного поперечного сечения в виде проволоки или нитевидных

кристаллов (табл. 5) с прочностью от 3 до 40 ГПа. При нагружении таких материалов волокна несут основную нагрузку, а матрицы обеспечивают определенные служебные свойства. Так при армировании алюминиевой матрицы волокнами бора или углерода повышается жаропрочность и удельная прочность КМ (табл. 7); вольфрамовые или углеродные волокна, введенные в никелевую матрицу, увеличивают жаропрочность КМ; органоволокниты имеют высокую удельную прочность при малой массе; бороволокниты имеют высокую твердость, прочность (табл. 8).

Таблица 2

Свойства металлических наполнителей

| Сталь | σ_B , МПа | Усталостная прочность, σ_{-1} , МПа |
|----------|------------------|--------------------------------------------|
| 14Г2 | 470 | 97 |
| 07Г2АФ | 450 | 90 |
| 14Г2АФ | 520 | 95 |
| 09Г2С | 510 | 78 |
| 10ХСНД | 525 | 80 |
| 15ХСНД | 490 | 70 |
| Титан | 1700 | - |
| Бериллий | 1400 | - |
| Молибден | 2500 | - |

Таблица 3

Свойства металлических матриц

| Матрица | ρ , г/см ³ | σ_B , МПа | E, ГПа |
|---------|----------------------------|------------------|--------|
| Al | 2,7 | 250 | 70 |
| Mg | 1,8 | 200 | 44 |
| Ni | 4,5 | 500 | 1/3 |
| Cu | 8,9 | 220 | 132 |

Таблица 4

Свойства полимерных матриц

| Матрица | σ_b , МПа | r , г/см ³ |
|-----------------------|------------------|-------------------------|
| Эпоксидная | 40 | 1,6 |
| фенолоформальдегидная | 35 | 1,4 |

Таблица 5

Свойства нитевидных волокон

| Материал наполнителя | σ_b , ГПа | r , г/см ³ |
|----------------------|------------------|-------------------------|
| Сталь | 3,5 | 7,9 |
| Стекло | 4,0 | 2,5 |
| Углерод | 3,0 – 5,5 | 2 |
| Карборунд | 3,0 | 3,2 |
| Бор | 3,5 | 2,6 |
| Нитевидные кристаллы | | |
| Корунд | 30,0 | 3,8 |
| Карборунд | 40, 0 | 3,2 |

Таблица 6

Свойства слоистых КМ

| Композиционный материал | σ_b , МПа | Теплостойкость, °С |
|-------------------------|------------------|--------------------|
| Гетинакс | 100-150 | 150-180 |
| Текстолит | 50-100 | 120-135 |
| Стеклотекстолит | 200-350 | 185-360 |

Таблица 7

Свойства КМ на металлической основе

| КМ | Матрица | Наполнитель | | ρ , кг/см ³ | $\sigma_B/\rho g$, км | σ_B , МПа | $\sigma-1$, МПа |
|-------|---------|-----------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|
| | | Материал (волокно) | Кол- во в % | | | | |
| ВКА-1 | Al | Борное | 50 | 2,65 | 45 | 1200 | 600 |
| ВКУ-1 | Al | Углеродное | 40 | 2,3 | 42 | 1000 | 200 |
| КАС-1 | Al | Стальное | 40 | 4,8 | 33 | 1600 | 350 |

Таблица 8

Свойства КМ на полимерной матрице

| КМ | ρ , кг/см ³ | σ_B , МПа | $\sigma_B/\rho g$, км | $\sigma-1$, МПа |
|------------------|-----------------------------|------------------|------------------------|------------------|
| Углеволониты | 1,47 | 1020 | 70 | 500 |
| Бороволониты | 2 | 1300 | 65 | 420 |
| Органоволониты | 1,4 | 700 | 50 | - |
| Стекловолокониты | 2,2 | 2100 | 96 | - |

4. Порядок выполнения работы

1. Дать определения композиционного материала (КМ),
2. Сформулировать функции заданных матрицы и упрочнителя,
3. Для композиционных материалов (матрица алюминий – волокно стальное) и (матрица эпоксидная - волокно стеклянное) по уравнению аддитивности (1) вычислить содержание волокнистых наполнителей в КМ в % ,
4. Рассчитать удельную прочность перспективных КМ с алюминиевой и полимерной матрицей при наполнении их нитевидными волокнами карборунда (с использованием уравнения 1). Объемная доля волокна в композиционном материале составляет 40-50% .
5. Оценить усталостную прочность КМ и традиционных материалов.
6. Оценить количественно потенциальные возможности КМ для уменьшения материалоемкости продукции, изготовленной из традиционных материалов.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое композиционный материал?
2. Назначение матрицы и наполнителя.
3. Классификация КМ по геометрической форме наполнителя.
4. Классификация КМ по виду наполнителя.
5. Классификация КМ по форме наполнителя схеме армирования.
6. За счет чего обеспечиваются связь между волокнами и матрицей
7. В чем проявляется адгезионная связь двух разнородных поверхностей матрицы и наполнителя?
8. Механизм упрочнения КМ с зернистым наполнителем.
9. Механизм упрочнения КМ с волокнистым упрочнителем.
10. Что такое удельная порочность КМ и ее значение в реальных металлических сплавах и КМ?

Список рекомендуемой к изучению литературы

1. Волков Г.М. Материаловедение: Учебник Г. М. Волков, В.М. Зуев. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 400 с.
2. Фетисов Т.П. Материаловедение и технология металлов: Учебник для студ. высш. техн. учеб. заведений / Т.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.Л. Матюнин и др. : под. Ред. Т.П. Фетисова. - М.: Высшая шк., 2007. - 639 с.
3. Евстифеев В.В. Электротехнические материалы, пластмассы, смазывающе-охлаждающие жидкости, резины, композиты: Учебное пособие / В.В. Евстифеев, М.С. Корытов, В.Г. Азаров. Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. – 41 с.
4. Огневой В.Я. Машиностроительные материалы: учебное пособие / В.Я. Огневой. – Барнаул: Изд – во АлтГТУ, 2002. – 343 с.

Содержание

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Характеристика композиционных материалов | 4 |
| 2. Механизмы упрочнения композиционных материалов | 8 |
| 2.1. Механизмы упрочнения КМ с зернистым наполнителем | 8 |
| 2.2. Механизм упрочнения КМ с волокнистыми наполнителями | 9 |
| 3. Назначение и характеристики порошковых, дисперсно-упрочненных и волокнистых композиционных материалов | 10 |
| 3.1. Порошковые КМ | 10 |
| 3.2. Дисперсно-упрочненные КМ | 11 |
| 3.3. Волокнистые КМ | 11 |
| 4. Порядок выполнения работы | 14 |
| 5. Контрольные вопросы | 15 |
| 6. Список рекомендуемой к изучению литературы | 15 |

Учебное издание

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплинам «Материаловедение», «Материаловедение. Технология конструкционных материалов», «Технология автомобиле - и тракторостроения», «Конструкторско-технологические решения для обеспечения безопасности проектируемых и эксплуатируемых объектов»

Составители:

Владислав Викторович Евстифеев, Валентин Иванович Матюхин,
Валерий Викторович Акимов

Отпечатано в авторской редакции

Подписано к печати 2012
формат 60x90 1/16 ; Бумага офсетная
Гарнитура Times New Roman
Отпечатано на дупликаторе
Усл. п. л. ; уч.-изд. л.
Тираж 250 экз. Заказ №
Цена договорная

Отпечатано в полиграфическом отделе УМУ СибАДИ
644080, г. Омск, пр. Мира, 5.