

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

С.И.Веселов, Г.Г.Картамов

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

У т в е р ж д е н о
редакционно-издательским
советом института
в качестве
учебного пособия

Куйбышев 1986

Веселов С.И., Карташов Г.Г. Композиционные материалы в авиадвигателестроении: Учебное пособие. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - 122 с.

В учебном пособии приведены свойства современных композиционных материалов (КМ), рассмотрены вопросы применения КМ в авиадвигателестроении, проектирования и конструирования элементов ГТД из КМ, расчета лопаток турбомашин на прочность, обеспечения вибропрочности композиционных конструкций и изготовления деталей из КМ.

Пособие предназначено для студентов специальности 0537, изучающих курс "Конструкция двигателей", выполняющих курсовые и дипломные проекты на кафедре "Конструкция и проектирование ДЛА" и обучающихся по программам целевой интенсивной подготовки, а также для слушателей факультета повышения квалификации.

Рецензенты: Н.В.Железняков, В.И.Цейтлин

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вопрос об использовании композиционных материалов (КМ) в авиадвигателестроении не является новым. Его история насчитывает примерно три десятилетия. За этот период были и оптимистические прогнозы, были и неудачи, а интерес к композитам не только оставался, но и усиливался. В чем же причина? Интерес, который конструкторы проявляют к композитам, закономерен и обусловлен рядом причин. Во-первых, естественный характер развития авиадвигателестроения приводит к росту параметров рабочего процесса, снижению массы и совершенствованию в целом конструкции ГТД. Это требует применения новых конструкторских решений, новых технологий и новых материалов, заставляя нас пересмотреть все этапы создания двигателя и выявить в них резервы. И здесь конструкторы хотят иметь дело с материалами, которые максимально могли бы приспособиться к условиям эксплуатации. Во-вторых, композиты уже сегодня имеют много заманчивых свойств, и, что самое главное, резервы улучшения свойств и возможности создания новых КМ далеко еще не исчерпаны. Они определяются развитием химии, материаловедения, технологии и других наук. Прогресс науки и появление композиционных материалов, идея которых заимствована у природы, — закономерный процесс, результат естественного развития цивилизации. Наконец, экономические проблемы. Усилия конструкторов направлены на поиск и внедрение мероприятий по экономии металла, особенно дефицитных легирующих элементов. Применение КМ способствует решению и этих проблем.

Успешному решению проблем широкого внедрения композитов в немалой степени способствует подготовка соответствующих специалистов. Поэтому предлагаемое учебное пособие является своевременным и необходимым для учебного процесса при подготовке специалистов в области авиадвигателестроения и для повышения их квалификации. Не все аспекты применения КМ в ГТД авторам удалось рассмотреть одинаково подробно. Однако поставленная цель данной работы в значительной степени ими достигнута.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБЗОР ИХ СВОЙСТВ

1.1. Основные понятия и классификация композиционных материалов /1-5/

Композиционные материалы (КМ) — искусственно созданные материалы, состоящие из двух или более компонентов, различающиеся по своему химическому составу, разделенные выраженной границей и имеющие новые свойства, отличные от свойств составляющих компонентов. КМ неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе. Непрерывный по всему объему КМ компонент называется матрицей (связующим), а прерывистый, разбавленный в объеме композиции — армирующим элементом (арматурой, наполнителем). Более общее понятие "композиционный материал" включает и природные материалы (агат, яшма, кости и др.) /5/. Для обозначения композиционных материалов в литературе используются также термины "композитный материал" и "композит".

Композиционные материалы классифицируются по следующим основным признакам: по материалу матрицы (металлические, полимерные — ПКМ и керамические) и армирующих элементов (волокна, нитевидные кристаллы), геометрии компонентов (порошковые или гранулированные, волокнистые и пластинчатые), структуре и расположению компонентов (с каркасной, матричной, слоистой и комбинированной структурой), методу получения (жидко- и твердофазные, осажденные или литейные, прессованные, намоточные и др.). Композиционные материалы по схеме армирования делятся на одноосно (линейно), двухосно (плоско) и трехосно (объемно) армированные материалы. По назначению КМ можно разделить на конструкционные, жаропрочные, трениевые и т.п.

Основным несущим элементом в КМ являются высокопрочные и высокомодульные наполнители. Роль матрицы в КМ заключается в придании изделию необходимой формы, создании монолитного, компактного материала, передаче усилий между слоями и волокнами, уменьшении концентрации напряжений вблизи дефектов, защите волокон от повреждений и окисления.

Для удобства обозначения структуры слоистого композиционного материала используется код структуры /4/ с небольшим дополнением /21/, согласно которым каждый слой обозначается числом (углом армирования) и буквой (сокращенным обозначением материала слоя, например стеклопластика - С, углепластика - У, боропластика - Б, бороалюминия - БА). Слои записываются последовательно от нижней поверхности пакета до верхней и разделяются косой линией. Полная сборка обозначается подстрочным индексом γ , половина симметричной сборки - $\mathcal{S}$. Например, код $(45\text{У}/30\text{С}/0\text{Б})_{\gamma}$ обозначает пакет, состоящий из слоя углепластика с углом армирования $\varphi = 45^\circ$, слоя стеклопластика с $\varphi = 30^\circ$ и слоя боропластика с $\varphi = 0^\circ$.

1.2. Теория армирования /1, 4, 6, 8, 9, 10/

1.2.1. Упругие характеристики анизотропных материалов

При исследовании КМ в условиях различного нагружения применяются макро- и микроструктурный подходы. При макроструктурном (макрOMEханическом) подходе КМ в пределах слоя рассматривается как однородная анизотропная среда, обладающая симметрией строения и свойств. Микроструктурный подход предусматривает исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) на уровне компонентов КМ. Он позволяет установить связи между свойствами КМ и свойствами его компонентов.

Связь между напряжениями σ , действующими на тело, и относительными упругими деформациями ε , вызванными этими напряжениями, устанавливает закон Гука, который для анизотропного (т.е. имеющего различные свойства в разных направлениях) тела имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_m &= A_{mn} \varepsilon_n \quad \text{и} \quad \varepsilon_m = a_{mn} \sigma_n, \quad \text{или} \\ \varepsilon_1 &= a_{11}\sigma_1 + a_{12}\sigma_2 + a_{13}\sigma_3 + a_{14}\sigma_4 + a_{15}\sigma_5 + a_{16}\sigma_6, \\ \varepsilon_2 &= a_{21}\sigma_1 + a_{22}\sigma_2 + a_{23}\sigma_3 + a_{24}\sigma_4 + a_{25}\sigma_5 + a_{26}\sigma_6, \\ &\vdots \\ \varepsilon_6 &= a_{61}\sigma_1 + a_{62}\sigma_2 + a_{63}\sigma_3 + a_{64}\sigma_4 + a_{65}\sigma_5 + a_{66}\sigma_6, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где A_{mn}, a_{mn} — коэффициенты упругости и податливости соответственно. Причем $A_{mn} = A_{nm}$ и $a_{mn} = a_{nm}$.

Композиционный материал может состоять из монослоев, армированных под различными углами φ (рис. 1.1). В системе координат, связанной с направлением армирования слоя ($1^k, 2^k, 3^k$), материал можно рассматривать как ортотропный (имеющий три плоскости упругой симметрии при плоском или объемном армировании) или трансверсально-изотропный (одна плоскость изотропии, нормаль которой совпадает с направлением одноосного армирования). В единой системе координат (1, 2, 3) ортотропный слой эквивалентен КМ с одной плоскостью упругой симметрии (1, 2). При наличии упругой симметрии закон Гука упрощается. Для материала с одной плоскостью упругой симметрии коэффициенты A_{mn} и a_{mn} с индексами 14, 15, 24, 25, 34, 35, 46 и 56 равны 0. Для ортотропного материала дополнительно к предыдущим коэффициентам равны нулю и коэффициенты с индексами 16, 26, 36 и 45. При наличии плоскости изотропии (нормаль к плоскости по оси 3) будем иметь $a_{11} = a_{22}$; $a_{13} = a_{23}$; $a_{66} = 2(a_{11} - a_{12})$.

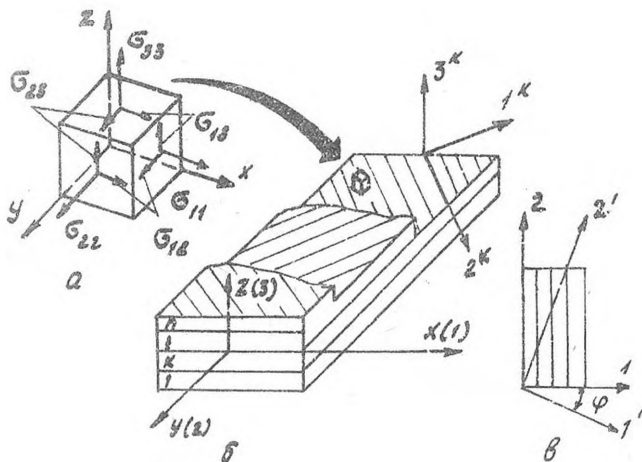
Упругие постоянные анизотропного материала связаны с техническими постоянными следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{\mu\mu} &= E_{\mu}^{-1}; \quad A_{pp} = G_{pp}^{-1}; \quad A_{i3} = -\mu_{i3} E_i^{-1} = -\mu_{3i} E_3^{-1}; \\ A_{\mu\rho} &= \nu_{\rho\rho, \mu} G_{\rho\rho}^{-1} = \nu_{\mu, \rho\rho} E_{\mu}^{-1}; \quad A_{ps} = 2\rho\rho, ss G_{\rho\rho}^{-1} = 2s_{\rho\rho} G_{ss}^{-1}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где $E_{\mu}, G_{\rho\rho}, \mu_{ij}, \nu_{\mu, ss} (\nu_{ss, \mu}) 2\rho\rho, \rho\rho$ — модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, коэффициент взаимного влияния первого (второго) рода, коэффициент Ченцова соответственно; $\mu = 1, 2, 3$; $s, \rho = 4, 5, 6$; $i = 1, 2$; $s \neq \rho$.

Коэффициенты упругости и податливости в произвольно направленной системе координат ($1', 2', 3'$) определяются по формулам преобразования

$$\begin{aligned} A'_{ii} &= A_{ii} c^4 + A_{jj} s^4 + 2(A_{12} + 2A_{66}) s^2 c^2; \quad A'_{i3} = A_{i3} c^2 + A_{j3} s^2; \\ A'_{12} &= (A_{11} + A_{22} - 4A_{66}) s^2 c^2 + A_{12} (s^4 + c^4); \quad A'_{36} = (A_{23} - A_{13}) 2sc; \\ A'_{16} &= [(-1)^j c^2 A_{ii} + (-1)^i s^2 A_{jj} + (-1)^i (A_{12} + 2A_{66}) (c^2 - s^2)] sc; \\ A'_{mm} &= A_{mm} c^2 + A_{nn} s^2; \quad A'_{45} = (A_{44} - A_{55}) sc; \quad A'_{33} = A_{33}; \\ A'_{66} &= (A_{11} + A_{22} - 2A_{12} - 2A_{66}) s^2 c^2 + A_{66} (s^4 + c^4); \\ a'_{ii} &= a_{ii} c^4 + a_{jj} s^4 + 2(a_{12} + a_{66}) s^2 c^2; \quad a'_{i3} = a_{i3} c^2 + a_{j3} s^2; \\ a'_{12} &= (a_{11} + a_{22} - 2a_{12} - a_{66}) s^2 c^2 + a_{12}; \quad a'_{36} = 2(a_{23} - a_{13}) sc; \\ a'_{16} &= [2(-1)^i c^2 a_{ii} + 2(-1)^j s^2 a_{jj} + (-1)^j (2a_{12} + a_{66}) (c^2 - s^2)] sc; \quad a'_{33} = a_{33}; \end{aligned}$$



Р и с. I.I. Слоистый композиционный материал: а - компоненты тензора напряжений; б - структура слоистого КМ; в - схема преобразования системы координат в однонаправленном КМ

$$a'_{mm} = a_{mm} C^2 + a_{nn} S^2; a'_{45} = (a_{44} - a_{55}) SC; a'_{66} = 4(a_{11} + a_{22} - 2a_{12} - a_{66}) S^2 C^2 + a_{66} \quad (I.3)$$

Формулы преобразования (I.3) можно представить и через технические постоянные. Для однонаправленного слоя при плоском НДС они имеют вид

$$\begin{aligned} E_i^{-1} &= E_i^{-1} C^4 + E_j^{-1} S^4 + 0,25(G_{12}^{-1} - 2\mu_{ij} E_i^{-1}) \tilde{S}^2; \\ G_{12}^{-1} &= G_{12}^{-1} + [(1 + \mu_{12}) E_1^{-1} + (1 + \mu_{21}) E_2^{-1} - G_{12}^{-1}] \tilde{S}^2; \\ \mu_{12} &= E_1 [\mu_{12} E_1^{-1} - 0,25[(1 + \mu_{12}) E_1^{-1} + (1 + \mu_{21}) E_2^{-1} - G_{12}^{-1}] \tilde{S}^2]; \\ \nu_{i,j} &= [C^2 E_i^{-1} - S^2 E_j^{-1} - 0,5(G_{12}^{-1} - 2\mu_{ij} E_i^{-1}) \tilde{C}] \tilde{S}, \end{aligned} \quad (I.4)$$

где $i, j = 1, 2; i \neq j; \tilde{C} = \cos 2\varphi; \tilde{S} = \sin 2\varphi; S = \sin \varphi; C = \cos \varphi;$
индекс 12 $\equiv 66; \mu_{21} = \mu_{12} E_2 / E_1$.

При макроструктурном подходе технические упругие постоянные КМ определяются экспериментально по результатам испытания образцов.

Одной из важнейших особенностей КМ является возможность создания из них элементов конструкции с заранее заданными свойствами, наиболее полно отвечающими характеру нагружения и условиям эксплуата-

ции деталей. Применение разнородных армирующих элементов и матриц, сочетание в одном композитном материале волокон с различными физико-механическими свойствами, дополнительное армирование полимерных КМ металлической фольгой, использование тугоплавких волокон и термостойких матриц и т.д. — все это позволяет направленно регулировать прочность, жесткость, уровень рабочих температур и другие свойства путем подбора состава, т.е. соотношения компонентов и структуры композиций. Поэтому необходимо знать свойства КМ в зависимости от свойств компонентов. Эти связи устанавливаются на основе микроструктурного подхода, который реализуется в виде различных методов расчета свойств КМ /1, 4, 6, 7, 10, 13/. Методы самосоогласования, регуляции структуры, а также вариационные и статистические методы либо очень трудоемки, либо дают погрешность, зависящую от концентрации арматуры, различия свойств компонентов, отклонения структуры и т.д. Трудоемким и громоздким является также подход, основанный на решении граничных задач теории упругости для многосвязных областей. Поэтому широко используются методы расчета упругих свойств КМ на основе допущений Фойгта $A_{ij} = \langle A_{ij} \rangle$ и Рейсса $a_{ij} = \langle a_{ij} \rangle$, где скобки $\langle \rangle$ обозначают средние величины.

Свойства однонаправленного слоя характеризуются четырьмя независимыми техническими постоянными: модулями упругости вдоль E_1 и поперек E_2 волокон, модулем сдвига G_{12} в плоскости слоя и коэффициентом Пуассона μ_{12} ($\mu_{21} = \mu_{12} E_2 E_1^{-1}$). Эти свойства определяются через свойства наполнителя (H), связующего (C) и их объемное содержание V по формулам /12/

$$\begin{aligned} E_1 &= E_H V_H + E_C V_C; \quad E_2 = 2 \left[1 - \mu_H + (\mu_H - \mu_C) V_C \right] \left[(1 - \omega) \frac{K_H (2K_C + G_C) - G_C (K_H - K_C) V_C}{(2K_C + G_C) + 2(K_H - K_C) V_C} + \omega \frac{K_H (2K_C + G_H) + G_H (K_C - K_H) V_C}{(2K_C + G_H) - 2(K_C - K_H) V_C} \right]; \\ G_{12} &= (1 - \omega) G_C \frac{2G_H - (G_H - G_C) V_C}{2G_C + (G_H - G_C) V_C} + \omega G_H \frac{(G_H + G_C) - (G_H - G_C) V_C}{(G_H + G_C) + (G_H - G_C) V_C}; \\ \mu_{12} &= (1 - \omega) \frac{\mu_H K_H (2K_C + G_C) V_H + \mu_C K_C (2K_H + G_C) V_C}{K_H (2K_C + G_C) - G_C (K_H - K_C) V_C} + \omega \frac{\mu_C K_C (2K_H + G_H) V_C + \mu_H K_H (2K_C + G_H) V_H}{K_H (2K_C + G_H) + G_H (K_C - K_H) V_C}, \end{aligned} \quad (I.5)$$

$$\text{где } K_{H(C)} = \frac{E_{H(C)}}{2(1 - \mu_{H(C)})}; \quad G_{H(C)} = \frac{E_{H(C)}}{2(1 + \mu_{H(C)})};$$

ω — экспериментальный корректирующий коэффициент, учитывающий фактор соприкосновения волокон; $0 \leq \omega \leq 1$.

1.2.2. Прочность анизотропных материалов

Макромеханический подход к проблеме прочности КМ состоит в исследовании зависимости прочности от углов между приложенными напряжениями и осями симметрии КМ и в установлении критериев предельных состояний (прочности и пластичности) при сдвиговых НДС.

Разрушающие напряжения при растяжении (сжатии) $\sigma_{\beta_1'}$ и сдвиге $\tau_{\beta_1', 2'}$ ортотропного слоя, армированного в направлении осей 1, 2, определяются по формуле

$$\sigma_{\beta_1'} = \sigma_0 / (c^4 + b\tilde{s}^2 + a s^4); \quad \tau_{\beta_1', 2'} = \tau_0 / (\tilde{c}^2 + n_{\tau} s^2), \quad (1.6)$$

где $c = \sigma_0 / \sigma_{90}$; $b = a - (1+c)/4$; $a = \sigma_0 / \sigma_{45}$; $\sigma_{0,45,90} = \sigma_{\beta_1'} (\varphi = 0, 45, 90^\circ)$.

Для оценки прочности КМ при сложном НДС необходимо знать критерии прочности, устанавливающие допустимые границы напряжений, в которых материал может работать без разрушения. Инженерные методы расчета основаны на различных феноменологических критериях. Выбор конкретного критерия зависит от степени анизотропии материала, имеющихся экспериментальных данных, выбранной концепции расчета и других факторов.

В соответствии с критерием максимальных напряжений разрушение КМ возникает при достижении напряжениями соответствующего предела прочности

$$\sigma_1 \leq \sigma_{\beta_1'}; \quad \sigma_2 \leq \sigma_{\beta_2'}; \quad \tau_{1,2'} \leq \tau_{\beta_1', 2'}. \quad (1.7)$$

Приложенные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{1,2'}$ связаны с напряжениями в главных осях упругой симметрии $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{1,2'}$ соотношениями

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_1' c^2 + \sigma_2' s^2 + \tau_{1,2'} \tilde{s}; \quad \sigma_2 = \sigma_1' s^2 + \sigma_2' c^2 - \tau_{1,2'} \tilde{s}; \\ \tau_{1,2} &= -\sigma_1' s c + \sigma_2' s c + \tau_{1,2'} (c^2 - s^2). \end{aligned} \quad (1.8)$$

Если $\sigma_2' = \tau_{1,2'} = 0$, то из формулы (1.7) с учетом выражения (1.8) получим критерий прочности

$$\sigma_1' \leq \sigma_{\beta_1'} / c^2; \quad \sigma_1' \leq \sigma_{\beta_2'} / s^2; \quad \sigma_1' = \tau_{\beta_1', 2'} / s c. \quad (1.9)$$

Критерий максимальных напряжений не учитывает совместное влияние различных компонентов тензора напряжений. Однако он учитывает различные механизмы разрушения (разрыв волокон и матрицы; разрушение от сдвига по плоскостям, параллельным волокнам).

В соответствии с критерием максимальных деформаций разрушение наступает при достижении компонентами тензора деформаций соответствующих допустимых значений, т.е. $\varepsilon_i > \varepsilon_i^*$, где ε_i^* - допустимые деформации.

Согласно энергетическому критерию прочности уравнение поверхности прочности для однонаправленного слоя имеет вид

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{\beta 1}^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_{\beta 1}^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{\beta 2}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{\beta}^2} = 1.$$

Поверхность прочности анизотропного тела в соответствии с критерием Мизеса-Хилла описывается тензором четвертого ранга (полиномом второй степени):

$$\Pi_{\alpha\beta\gamma\delta} \sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\gamma\delta} = 1. \quad (I.10)$$

Для ортотропного тела в главных осях упругой симметрии уравнение (I.10) имеет вид

$$\Pi_{11} \sigma_{11}^2 + \Pi_{22} \sigma_{22}^2 + \Pi_{33} \sigma_{33}^2 + 4(\Pi_{44} \sigma_{44}^2 + \Pi_{55} \sigma_{55}^2 + \Pi_{66} \sigma_{66}^2) + 2(\Pi_{12} \sigma_{11} \sigma_{12} + \Pi_{13} \sigma_{11} \sigma_{33} + \Pi_{23} \sigma_{22} \sigma_{33}) = 1. \quad (I.11)$$

Компоненты тензора прочности Π_{ij} выражаются через механические постоянные материала путем рассмотрения частных случаев нагружения. Например, при однокомпонентном нагружении $\sigma_{11} = \sigma_{\beta 1}$ получим $\Pi_{11} = \sigma_{\beta 1}^{-2}$ и т.д.

Критерий Е.К.Ашкенази является обобщением критерия Мизеса-Хилла для анизотропного тела в случае зависимости предельного состояния от гидростатического давления. Он представляется полиномом четвертой степени и при плоском напряженном состоянии имеет вид

$$a_{11}^2 \sigma_{11}^4 + a_{22}^2 \sigma_{22}^4 + 16a_{66} \sigma_{66}^4 + 2a_{11} a_{22} \sigma_{11}^2 \sigma_{22}^2 + 4a_{12}^2 \sigma_{11}^2 \sigma_{22}^2 + 4a_{11} a_{12} \sigma_{11}^3 \sigma_{22} + 4a_{12} a_{22} \sigma_{11} \sigma_{22}^3 + 8a_{11} a_{66} \sigma_{11}^2 \sigma_{66}^2 + 8a_{22} a_{66} \sigma_{22}^2 \sigma_{66}^2 + 16a_{12} a_{66} \sigma_{11} \sigma_{22} \sigma_{66}^2 - \sigma_{11}^2 - \sigma_{22}^2 - \sigma_{66}^2 \sigma_{22} = 0. \quad (I.12)$$

Коэффициенты a_{ij} определяются при рассмотрении различных частных случаев нагружения предельными нагрузками.

Критерий А.К.Малмейстера, являясь общим критерием прочности, имеет вид полинома, содержащего тензоры прочности второго, четвертого, шестого и более высоких рангов, выражаемые через константы материала:

$$P_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta} + P_{\alpha\beta\gamma\delta} \sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\gamma\delta} + P_{\alpha\beta\gamma\delta\epsilon\zeta} \sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\gamma\delta} \sigma_{\epsilon\zeta} + \dots = 1. \quad (I.13)$$

Существует и ряд других феноменологических критериев прочности /I, 6, 9, II/.

I.3. Обзор свойств композиционных материалов

I.3.1. Армирующие наполнители

В качестве армирующих наполнителей наибольшее применение нашли стеклянные, углеродные, борные и синтетические (органические) волокна, а также нитевидные кристаллы различных соединений.

Для армирования конструктивных стеклопластиков наиболее приемлемым является непрерывное фильерное стекловолокно алимоборосиликатного состава. В промышленном масштабе стекловолокна выпускаются диаметром 6...7 мкм. Свойства некоторых стеклянных волокон показаны в табл. I.1. Следует отметить, что если по удельной прочности σ_g/ρ стекловолокна не уступают другим видам армирующих наполнителей, то в отношении удельной жесткости E/ρ они существенно им уступают.

Как армирующий материал стекловолокна используются в виде тканей различного переплетения, стекломатов, ровницы, изготовленных из элементарных волокон. В табл. I.2 приведены характеристики некоторых стеклотканей.

Углеродные волокна изготавливаются путем карболизации органических текстильных волокон в инертной среде. Исходным сырьем для получения высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон являются преимущественно волокна полиакрилонитрила (ПАН), реже — гидратцеллюлозные волокна в виде нитей, ровницы, игутов и тканых лент. Исходные волокна в непрерывном процессе подвергают вытяжке с целью ориентации получаемых кристаллов и термической обработке, состоящей из трех стадий: окисления при 200...320°C, карболизации при 900...1500°C и графитизации при 2000...2800°C. Углеродные волокна устойчивы к действию воды и износу при высоких температурах. В качестве примера в табл. I.1 приведены свойства некоторых марок углеродных волокон. Одна из особенностей высокомодульных углеродных волокон, обусловленная их анизотропной структурой, — отрицательный коэффициент линейного термического расширения. В процессе нагрева этот коэффициент возрастает и при температуре выше 250°C становится

Т а б л и ц а I.1

Свойства армирующих наполнителей /I, I4-I6/

Армирующие наполнители	Прочность при растяжении $\sigma_B \cdot 10^{-1}$, МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Плотность ρ , г/см ³	Удельная прочность σ_B/ρ , км	Удельная жесткость $E \cdot 10^{-2}/\rho$, км
Стекловолокна:					
алюмоборосиликатные	340...370	7,4...8,6	2,55	133...145	29...34
высокомодульные типа ВМ-1	370...400	10	2,6	142...154	38,5
Углеродные волокна:					
в лентах (марки ЛУ-2, ЛУ-3, ЛН-УС и др.)	200...280	25...28	1,75	115...160	140...160
в нитях (марки ВМН-4, ВМН-5 и др.)	230...270	28...35	1,75	130...155	160...200
Борные волокна	250...400	38,5...43	2,5	100...160	155...170
Синтетические (органические волокна) на примере нити СВМ	300...400	12,5...13,5	1,4	215...285	90...100
Стальная проволока	290	21	7,8	37	27

1 МПа $\approx$ 10 кгс/см² $\approx$ 0,1 кгс/мм².

Т а б л и ц а I.2

Марки и характеристики некоторых стеклотканей /I4, I6/

Вид и марка ткани	Толщина ткани, мм	Плотность (число нитей на 1 см)		Прочность $\sigma \cdot 10^{-1}$ (разрывная нагрузка на полосу 25x100 мм)	
		Основа	Уток	Основа	Уток
Сатиновая АСТ(б) - С ₂	0,35	22	13	275	162
Сатиновая ТС 8/3-250	0,23	36	20	270	250
Плотная ТСК-0,7	0,7	2	3	250	300
Многослойная МТБС-2,5	2,5	7,2	4	1700	1100
Многослойная МТБС-8	8,4	4,8	2,8	2700	1500
Высокомодульная корднокруговая Т-25(ВМ)-78	0,2	10	6	510	46

ся положительным. Для изготовления материалов и деталей из углепластиков используется широкий ассортимент армирующих наполнителей, которые по составу можно разделить на две основные группы:

- 1) наполнители из углеродных волокон (шнуты, ленты, ткани);
- 2) комбинированные наполнители из углеродных волокон и сочетания со стеклянными, синтетическими и другими волокнами (преимущественно ленты и ткани).

Наиболее распространенной структурой наполнителя является ровница небольшой крутки с числом моноволокон от 1000 до 10000 и кручение шнута. Особое место занимает кордина лента из углеродных волокон шириной до 400 мм и толщиной 0,1...0,3 мм, в которых прочные нити основы связаны малопрочным утком.

Борные волокна производятся путем восстановления водородом треххлористого бора или путем разложения борводородов с одичере — менным осаждением из газовой фазы образующегося металлического бора на нагретую до 1100°C тонкую подложку (обычно вольфрамовую проволоку диаметром 0,01...0,012 мм). Режимы получения (температура, чистота и концентрации реагентов, их соотношение) в значительной мере определяют структуру осажденного бора, а следовательно, и свойства волокон. Борное волокно имеет гетерогенную структуру: сердцевину диаметром около 16 мкм, состоящую из боридов вольфрама W_nB_m плотностью 8...15 г/см³, и борную оболочку плотностью 2,2 г/см³. Диаметр стандартных борных волокон составляет 100 и 150 мкм. Свойства волокон приведены в табл. I.I. Волокна бора характеризуются малой поперечностью и высокой длительной прочностью.

Для армирования матриц применяют следующие виды борных наполнителей: моноволокна; шнuty из нескольких волокон с оплеткой стеклянными или органическими волокнами; ленты, скрепленные связующими на подложке из тонкой стеклянной ткани; ткани разного плетения, в которых шнuty из волокон бора сочетаются со стеклянными или органическими волокнами в различных соотношениях.

Использование шнута, лент и тканей вместо моноволокон позволяет сократить трудоемкость изготовления изделий.

Синтетические волокна используются в качестве армирующего наполнителя для сравнительно нового вида полимерных КМ — конструктивных органопластиков. Наиболее широкое применение нашли синтетические высокомолекулярные волокна (типа СВМ), свойства которых приведены в табл. I.I. Для органопластиков электро- и радиотехнического

назначения применяются волокна типа лавсан и полипропилен. На основе синтетических волокон созданы армирующие наполнители различных структур: нити, клубы, ленты, ткани однослойные, многослойные, трикотаж, бумага. Комбинированные ткани изготавливаются путем сочетания синтетических нитей со стеклянными, углеродными и борными нитями.

Нитевидные кристаллы служат в основном для существенного (в 3...5 раз) повышения прочностных и деформационных характеристик полимерных матриц. Это достигается введением нитевидных кристаллов в межволоконное пространство композиций /16/. Разработаны различные методы вискеризации, основанные на выращивании нитевидных кристаллов на поверхности углеродных волокон в процессе химических реакций из газовой фазы и осаждении нитевидных кристаллов на поверхность углеродных и борных волокон из аэрозоля и суспензии. Преимуществом последних двух методов является не только значительное снижение стоимости технологического процесса, но и возможность вискеризации стеклянных, борных, органических и других волокон, на поверхности которых выращивать нитевидные кристаллы не удается.

Вискеризация уплотнителей способствует повышению жесткости и прочности КМ при межслойном сдвиге, поперечном отрыве и сжатии пропорционально количеству вводимых кристаллов. При оптимальной степени вискеризации, составляющей 4...6%, указанные характеристики увеличиваются в 1,5...2 раза. Для армирования полимерных матриц нитевидные кристаллы применяют в виде ориентированной пряжи и изотропных структур — бумаг, картонов и матов, где кристаллы расположены хаотически. В межволоконное пространство КМ, армированных непрерывными волокнами, кристаллы вводят россыпью. Из большого количества синтезированных в настоящее время монокристаллов тугоплавких соединений наибольший интерес для армирования КМ представляют нитевидные кристаллы (усы) графита, окислов Al_2O_3 и TiO_2 , карбидов SiC и B_4C , нитридов Si_3N_4 и AlN , имеющих низкую плотность, высокую прочность и термостойкость. Длина волокон колеблется от 0,35 мм (у TiO_2) до 7 мм (у SiC). Прочность при растяжении достигает 5000 МПа, а модуль упругости — $(30-40) \cdot 10^4$ МПа.

1.3.2. Матрицы

При создании КМ применяются металлические и полимерные матрицы. В качестве металлических матриц могут быть использованы любые кон-

струкционные металлы и сплавы, например алюминий.

Для производства стекло-, угле-, боро- и органопластиков применяются матрицы на основе полимерных связующих - синтетических полимеров линейной молекулярной структуры, которые вследствие своей химической активности в процессе термообработки отвердевают под действием активаторов (инициаторов). В результате происходящего "сшивания" (химического соединения) линейные молекулы приобретают пространственно-сетчатую молекулярную структуру и необратимое термостабильное состояние. Связующие склеивают волокнистые армирующие материалы, обеспечивая их одновременную деформацию под нагрузкой, и определяют технологические свойства композиции, оказывая также влияние на весь комплекс свойств отвержденного материала. С целью улучшения свойств применяемые в качестве матриц эпоксидные, кремний-органические, полиимидные и другие термореактивные связующие чаще всего применяются в модифицированном виде (с добавками других полимеров).

Свойства некоторых полимерных связующих приведены в табл. 1.3.

1.3.3. Композиционные материалы

Максимальными прочностными и жесткостными показателями обладают материалы с параллельным расположением непрерывных волокон при нагружении в направлении армирования. Характеристики КМ линейно возрастают по мере повышения прочности и жесткости армирующих волокон. Анализ свойств КМ (табл. 1.4) свидетельствует о том, что угле- и боропластики, боромагний и бороалюминий по прочности и жесткости вышли на уровень сталей и титановых сплавов, а стеклопластики - на уровень алюминиевых сплавов. Наибольшей прочностью при растяжении обладают органопластики. Однако они отличаются низким сопротивлением сжатию (400 МПа), поперечному растяжению (150 МПа) и сдвигу (60...80 МПа). КМ существенно превосходят металлы по удельным характеристикам.

В табл. 1.5 и 1.6 приведены свойства некоторых стекло-, угле-, боропластиков, а в табл. 1.7 - свойства трехкомпонентных материалов (углеоргано- и углестеклопластиков) с различным соотношением компонентов. Свойства даны в основном для одноосной ориентации волокон. Из табл. 1.7 видно, что сочетанием разнородных армирующих компонентов может быть обеспечено регулирование прочностных характеристик. Регулирование свойств достигается также перекрестным расположением волокон, т.е. выбором схем армирования. Это позволяет создавать ма-

Т а б л и ц а 1.3
Механические свойства некоторых полимерных связующих /14/

Материал	Разрушающее напряжение, $\sigma \cdot 10^{-1}$, МПа				Модуль упругости $E \cdot 10^{-1}$, МПа	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-1}$, МПа	Ударная вязкость $a \cdot 10^{-3}$, Н.м/м ²
	Растяжение	Сжатие	Сдвиг	Изгиб			
На основе эпоксидной смолы ЭД-5	7...9	13...16	5...6	10...12	250...330	95...127	11...20
На основе эпоксидно-фениловой смолы ЭФ	4...6	14,5...16	3...4	5...7,5	250...300	95...115	8...20
Фенолформальдегидные	4...7	10...12,5	3...4	7...11	140...430	55...165	2,5...10
Кремнийорганические	-	6...10	-	-	420...450	160...173	2,5...3,5
Полиимидные	9...9,5	25...28	-	-	320...500	123...192	-

Т а б л и ц а 1.4
Ориентировочное сравнение свойств металлов и композиционных материалов /1, 2, 14-17/

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Предел прочности при растяжении $\sigma_B \cdot 10^{-1}$, МПа	Предел выносливости $\sigma_{-1} \cdot 10^{-1}$, МПа (10 ⁷ циклов)	Логарифмический декремент δ , %	Вибропрочность $\sigma_{-1} \cdot 10^{-1}$, МПа	Удельные характеристики		
							$E \cdot 10^{-2}$, МПа	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа
Алюминевый сплав Д16	2,78	7,1	52	14	0,65	9,1	25	19	5
Титановый сплав ВТ8	4,48	11,0	105-118	50	0,03	1,5	25	23-26	11
Сталь 40ХНМА	7,82	20,4	140-170	85-160	0,70	60-112	26	18-22	11-20
Боралюминий	2,65	25,0	120	70	0,60	42	95	45	26
Бороматний	2,15	22,0	120-130	60	0,60	36	102	56-60	28
Боропластик	2,0	25,0	100-120	50	1,80	90	125	50-60	25
Углепластик	1,5	12-18	70-110	40	1,60	64	80-120	46-73	27
Стеклопластик	2,0	3-5	60-100	20	2,80	56	15-25	30-50	10
Органопластик	1,3	3-8	250-270	24	2,10	50	23-61	192-208	18

Свойства некоторых стеклопластиков (стекловолокнистых и стеклотекстолитов) /14/

Характеристика материала	Стекловолокнисты на основе эпоксидного связующего		Стеклотекстолиты на основе эпоксидного связующего и стеклоткани ТС 8/3-250		
	Укладка		Тип волокон		
	одна на- правленная	ортого- нальная (1:1)	алюмоboro- силикатное	Т-273	ВМ-1
Плотность ρ , г/см ³	1,7	1,8	1,79	1,92	1,92
Прочность при растяжении $\sigma_b \cdot 10^{-1}$, МПа	82	51	—	—	—
по основе	—	—	55	70	80
по утку	—	—	30	37	40
Модуль $E \cdot 10^{-1}$, МПа	4000	3000	—	—	—
по основе	—	—	3100	3400	3700
по утку	—	—	2300	2500	2500

териал на стадии проектирования конструкции, исходя из условий нагружения.

На рис. 1.2, а, б приведены зависимости упругих свойств бороалюминия от объемной доли матрицы и угла армирования, полученные расчетным путем по формулам (1.4) и (1.5) и подтвержденные экспериментально /12/. Следует отметить, что характер изменения пределов прочности при растяжении (изгибе) и сдвиге от угла армирования примерно идентичен характеру изменения модуля упругости E и G от φ соответственно. С увеличением температуры жесткость и прочность КМ снижаются. В большей степени это происходит за счет снижения свойств

материала и некоторого разупрочнения армирующих элементов. Например, при увеличении температуры от 20 до 500⁰С прочность бороалюминия в направлении армирования снижается с 1000-1200 МПа до 500 МПа, а модуль упругости — с $25 \cdot 10^4$ до $22 \cdot 10^4$ МПа /17/. Следует отметить, что с ростом температуры повышаются диссипативные свойства КМ, причем интенсивнее, чем снижаются прочность и жесткость. Уровень рабочих температур для КМ определяется свойствами матрицы и составляет для эпоксидных и фенолформальдегидных смол 200...250⁰С, полиимидных — 300...350⁰С. Необходимо отметить, что КМ достаточно стойки к воздействию тропического климата и микробов. Органопластики устойчивы к воздействию механического и баллистического ударов, дождевой и пылевой эрозии, большинства агрессивных сред. Вмес-

Свойства однонаправленных композиций на основе высокомолекулярных углеродных и борных волокон /15/

Характеристика материала	Углепластики, марка материала				Боропластики, марка материала			
	КМУ-1	КМУ-1У	КМУ-1Л	КМУ-2У	КМУ-3	КМБ-1	КМБ-1м	КМБ-3
	Наполнители и связующие				Наполнители и связующие			
	Жгут ВМН-3 или ВЭН-2Д	Жгут ВМН-4	Лента ЛУ-2	Жгут ВМН-4	Жгут ВМН-4	Волокно борное (сортШ)	Волокно борное (сортЛ)	Нить КБШ-4
	Эпоксифенольное		Полиамидное		Эпоксифенольное		Эпоксидное	
	1,5 16000	1,5 18000	1,4 12000	1,4 14000	1,45 18000	2,0 18900	2,0 27000	2,0 25000
Плотность, г/см ³	1,5	1,5	1,4	1,4	1,45	2,0	2,0	2,0
Модуль упругости, 10 ³ МПа	16000	18000	12000	14000	18000	18900	27000	25500
Предел прочности, 10 ³ МПа	74	102	65	90	110	120	120	120
при растяжении	80	110	90	110	130	120	175	165
при изгибе	25	40	30	40	45	84	116	150
при сжатии	3,0	3,0	2,5	3,0	4,5	4,4	6,0	7,5
при сдвиге								
Усталостная прочность при изгибе, 10 ³ МПа	35	50	30	40	40	36	40	50
10 ⁶ циклов, МПа								
Длительная прочность, 10 ³ МПа	66	88	60	80	90	73	140	140
при изгибе за 1000 ч, МПа								
Ударная вязкость, М-м/м ²	25	44	50	40	45	45	90	60
Температура сохранения 80-процентной прочности, °С	200	200	300	300	85	200	200	100

Т а б л и ц а 1.7

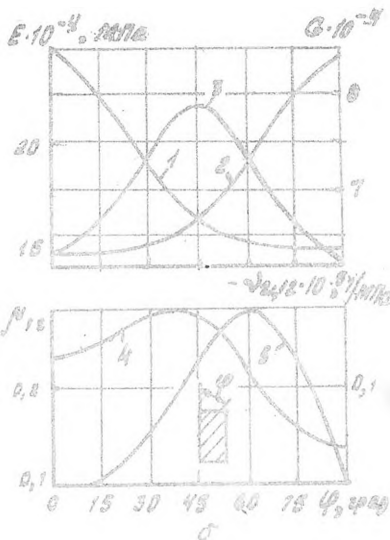
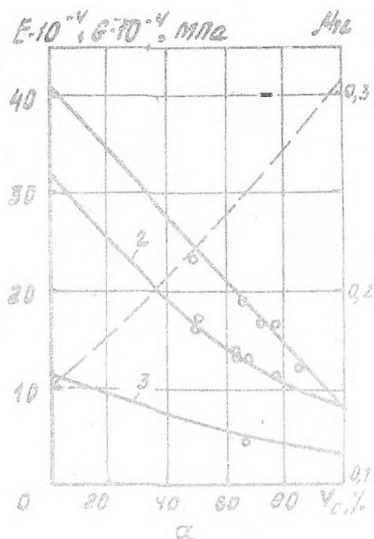
Физико-механические характеристики при растяжении трехкомпонентных материалов с одноосной ориентацией волокон на основе модифицированного эпоксидного связующего /16/

Наполнитель	Соотношение наполнителей, %		Объемное содержание, % (остальное - поры)			$\sigma_b \cdot 10^4$	$E \cdot 10^{-4}$
	углерод	Стекло, СВМ	Связующее	углерод	Стекло, СВМ	МПа	
Углеродная лента ЛН-УС+нить СВМ из органоволокна	100	-	37,9	54,2	-	60	15,30
	83	17	41,1	38,6	22,0	58	12,70
	59	41	42,0	26,7	22,8	55	9,80
	-	100	33,7	-	61,1	103	5,36
ЛН-УС+ кордно-жгутовая стекло-ткань Т-25(ВМ)-78	100	-	37,9	54,2	-	60	15,28
	72	28	35,0	40,8	15,7	66	13,25
	57	43	37,2	31,9	24,3	65	11,27
	-	100	33,0	-	63,3	116	5,20
Углеродный жгут ВМН-4+СВМ	100	-	39,4	59,3	-	105	18,76
	76	24	35,0	47,3	15,0	98	17,55
	68	32	35,0	43,0	19,5	82	16,58
	-	100	31,5	-	63,0	103	5,36
ВМН-4+Т-25(ВМ)-78	100	-	39,4	59,5	-	105	18,76
	75	25	36,2	46,4	14,8	96	15,44
	62	38	34,8	38,3	24,0	74	12,70
	-	100	36,7	-	62,0	116	5,20

те с тем КМ на основе высокомодульных волокон (угле- и боропластики) обладают относительно низкой ударной вязкостью.

Недостатком полимерных КМ является низкое сопротивление межслойному сдвигу. Улучшению межслойной прочности и жесткости способствуют пространственные схемы армирования, в которых межслойные связи в композициях обеспечиваются применением тканей объемного переплетения, сшивкой армирующих слоев и отмеченной выше вискеризацией нитевидными кристаллами.

Одной из причин, сдерживающих применение полимерных КМ для деталей ГТД, подверженных воздействию запыленного воздушного потока, является сравнительно низкая эрозионная стойкость этих материалов. Поэтому выбор эрозионно стойких покрытий (прежде всего, для лопаток компрессора) имеет актуальное значение. Наиболее эффективная защита от эрозии обеспечивается металлической фольгой (особенно на кромках лопаток), комбинированными электрохимическими покрытиями на никелевой сетке, композитами на супертонких нитевидных кристаллах, а также эластомерными покрытиями (например, пленочными клеями на каучуковой основе).

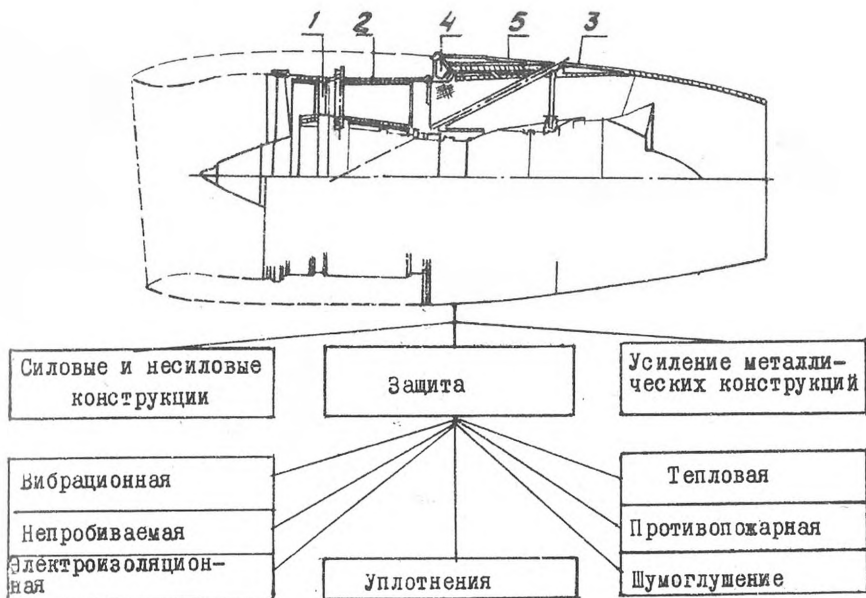


Р и с. 1.2. Зависимость упругих свойств бор-алюминия ($E_H = 42 \cdot 10^4$ МПа; $E_0 = 7,25 \cdot 10^4$ МПа; $\mu_H = 0,15$; $\mu_0 = 0,33$; $\omega = 0,2$) от объемной доли матрицы V_0 (а) и угла ориентации φ (б): E_1-1 ; E_2-2 ; $G_{12}-3$; $\mu_{12}-4$; $\nu_{2,12}-5$

Из приведенного обзора следует, что решение комплексной проблемы создания работоспособных изделий из КМ базируется на рациональном выборе материалов с учетом условий работы элементов конструкции.

2. ОБЛАСТЬ ВОЗМОЖНОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГТД

К материалам, применяемым для изготовления деталей ГТД, предъявляются высокие и разнообразные требования. Судьба применения КМ в первую очередь решается сравнением их свойств с характеристиками традиционных материалов и оценкой возможности удовлетворения техническому заданию. При выборе материала следует учитывать технологические факторы (производственный процесс, обрабатываемость материа-



Р и с. 2.1. Область возможного применения КМ в ГТД: 1 – рабочие и направляющие лопатки компрессора; 2 – оболочки наружного контура и звукопоглощающие конструкции; 3, 4, 5 – элементы реверсивного устройства (капоты, створки, пилон)

ла, требования к механической обработке, сборке и инструменту), физико-механические и другие специальные свойства и их стабильность (статические и усталостные свойства при различных видах нагружения, критерии прочности, параметры жесткости, демпфирующую способность, термостойкость, коэффициенты теплопроводности и температурного расширения, электроизоляционные свойства, ударную вязкость, эрозионную стойкость и стойкость к концентраторам напряжений и др.), режим работы и условия эксплуатации (температуру, влажность, вакуум, радиацию, удар молний, воздействие морских солей и т.п.), специфику свойств КМ (анизотропию и неоднородность, старение и малые деформации) и ряд других важнейших факторов (международные, государственные, коммерческие, экономические аспекты и др.).

Современная концепция развития авиастроения предполагает многоцелевое применение КМ в ГТД. Целями могут быть снижение веса,

уменьшение стоимости и трудоемкости, достижение заданного уровня параметров, а также технического эффекта, направленного на повышение надежности и ресурса. Уровень свойств и преимущества композитов определяют область их возможного применения в ГТД (рис. 2.1). Здесь просматриваются два основных направления. Первое связано с применением КМ как конструкционного материала, второе — с обеспечением различного рода защиты. Рассмотрим эти направления /4, 18, 19, 21, 23, 26/.

2.1. Конструкционное применение композиционных материалов

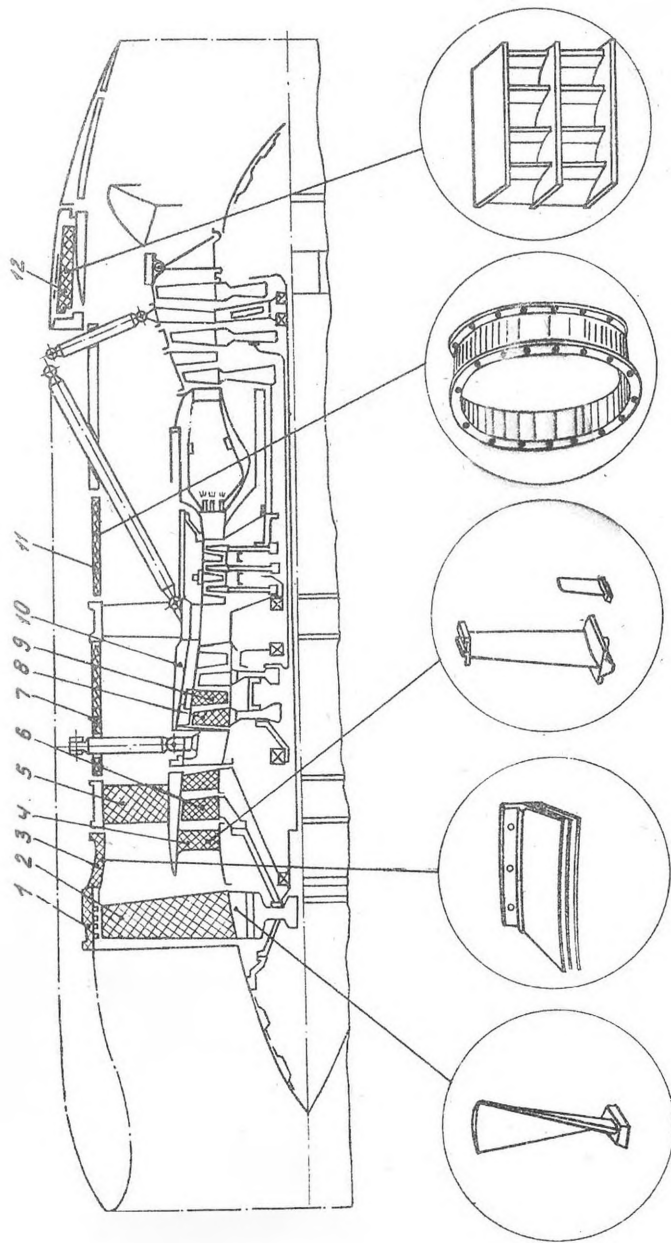
Диапазон рабочих температур КМ определяется матрицей. Поэтому из полимерных КМ целесообразно изготовление элементов конструкции ГТД, работающих в области температур до $250...300^{\circ}\text{C}$. При этих температурах можно использовать и КМ на алюминиевой матрице. Детали, работающие при температуре $450...550^{\circ}\text{C}$, могут быть изготовлены из КМ с титановой матрицей. Как конструкционный материал КМ может использоваться для изготовления тракторных оболочек, капотов, решеток реверса тяги, рабочих и направляющих лопаток вентилятора и других деталей (рис. 2.2). Рассмотрим примеры конструкционного применения КМ.

1. Рабочие лопатки компрессоров низкого и высокого давления (рис. 2.2, позиции 2, 6, 8). Для изготовления лопаток вентилятора 2 возможно применение бореалюминия или комбинированных материалов на основе сочетания высокомодульных и высокопрочных органических стеклинных, угольных и борных волокон. Практическая реализация таких композиций требует обеспечения совместной работы разномодульных волокон, противокоррозийной защиты, надежного соединения пера с замковой частью, достаточной ударной вязкости.

2. Направляющие аппараты компрессора (позиции 4, 5, 9). Для их изготовления можно применять стеклоуглепластик, обеспечивающий необходимую жесткость, вибропрочность и технологичность процесса изготовления.

3. Корпусные детали компрессора (позиции 1, 3, 7, 10). Они могут быть получены из стекло-, органопластика и органостеклоуглепластика с помощью пропитки под вакуумом и давлением.

4. Оболочки, образующие воздушный тракт наружного контура II, в зависимости от условий нагружения могут быть изготовлены из углепласт-



Р и с. 2.2. Композиционные элементы в конструкции ГТД

тика или металлокомпозитной системы (металл + КМ). Ряд оболочек такого типа был получен способом намотки. Работоспособность их проверена длительными испытаниями на двигателе.

5. Решетки и отборки реверса тяги I2 могут быть изготовлены из металлокомпозитной системы (металл + органоуглепластик) или органо-стеклопластика .

6. Элементы конструкции типа небольших крышек, кожухов, фланцев и т.п. в зависимости от условий работы могут быть изготовлены из стеклопластиков различных марок и других КМ.

Важным направлением конструкционного применения КМ является использование их для усиления металлических деталей ГТД. Металло-композитные конструкции обладают меньшей массой, повышенными жесткостью и несущей способностью. Наибольший эффект достигается при усилении таких крупногабаритных деталей, как воздухозаборник, корпус вентилятора и компрессора, диски компрессоров и др. /19/. С этой целью обычно применяются угле- и боропластики, а также высокомодульные и высокопрочные стеклопластики.

2.2. Применение композиционных материалов для защиты элементов ГТД

Условия эксплуатации ГТД и режим работы элементов конструкции, требования экономичности, безопасности и надежности приводят к необходимости применения различного рода защиты (см. рис. 2.1). Применение для этих целей КМ может быть весьма эффективным.

2.2.1. Вибрационная защита

Важность обеспечения вибропрочности элементов двигателя очевидна. В настоящее время существует ряд методов борьбы с усталостными поломками металлических конструкций: изменение спектра и уменьшение уровня действующих нагрузок, повышение сопротивления усталости и демпфирующих свойств материала, применение специальных демпферов и повышение конструкционного демпфирования, отстройка от опасных резонансных частот и форм колебаний. С помощью КМ можно повысить эффективность защиты за счет обеспечения достаточной вибропрочности и частотной отстройки. Усилением металлических элементов высокомодуль-

ными и высокопрочными КМ достигается повышение выносливости и демпфирующих свойств и, таким образом, обеспечивается необходимая вибропрочность. Для повышения диссипативных свойств деталей применяются слоистые металлополимерные и металлокомпозитные системы /20/. Эффективность применения демпфирующих покрытий рассмотрена в разделе 5.4. Большими возможностями обладает метод частотной отстройки. Изменение жесткости детали за счет КМ приводит к "уходу" от резонансных частот. Частотная отстройка может применяться для оболочек, дисков и лопаток компрессора. При этом может достигаться двойной эффект - повышение вибропрочности и частотная отстройка /19, 21/.

Опыт эксплуатации и доводки элементов из КМ свидетельствует о том, что и для них актуальна проблема обеспечения вибропрочности.

Ни один из известных /22/ методов нельзя исключить из арсенала средств борьбы с поломками элементов из КМ. Возможности одних методов при этом расширяются, применение других на данном этапе малоэффективно. Так, при воздействии на спектр возбуждения возможно применение приемов, разработанных для металлических конструкций. Однако эффективность их может быть ниже, например, из-за больших допусков на изготовление элементов из КМ. Повышение усталостных и демпфирующих свойств материала является эффективным средством (см. раздел 5). Резервы этого повышения на сегодня не исчерпаны. Применение специальных демпферов, в которых реализуется сосредоточенное демпфирование, в настоящее время, по-видимому, нецелесообразно, так как лучшие демпферы дают декремент колебаний примерно на уровне значения декремента КМ, причем при колебаниях только по определенной форме. Кроме того, они усложняют конструкцию, снижают технологичность и надежность. Наиболее эффективный метод борьбы с вибрационными разрушениями элементов из КМ - частотная отстройка. Она достигается одним из способов: варьированием конструктивных параметров элемента, управлением структурой материала; изменением граничных условий (выбором оптимальной жесткости узлов крепления); сочетанием предыдущих подходов. Рассмотрим возможности каждого из этих способов применительно к лопаткам компрессора.

Допустим, конструктивным изменением является, например, увеличение на 16% толщины лопатки введением на $1/3$ ее высоты дополнительного клина из КМ различной структуры (табл.2.1). Здесь код I - $\varphi = 0^\circ$, СУ - 72...75%У, 25...28%С, 2 отличается от I армированием 20...25% наружных слоев У под углом $\varphi = \pm 30^\circ$ (см. раздел 1.1).

Таблица 2.1

Влияние внутреннего (в) и наружного (н) расположения клина с различным углом армирования на относительные частоты колебаний лопаток турбомашин двух структурных вариантов /1, 2/

Вид лопатки (тип)	Шифр лопатки - тип структуры, месторасположение клина (угол его армирования)	Относительная частота колебаний лопатки		
		 $\frac{f^p_{20}}{f^э_{20}}$	 $\frac{f^p_{21}}{f^э_{21}}$	 $\frac{f^p_{22}}{f^э_{22}}$
	 I-исходный вариант	$\frac{I}{I}$	$\frac{I}{I}$	$\frac{I}{I}$
	 Iв	$\frac{I,07}{I,05...I,10}$	$\frac{I,16}{I,18...I,19}$	$\frac{I,10}{I,09...I,13}$
	 Iн (0)	$\frac{I,03}{I,03...I,04}$	$\frac{I,13}{I,14...I,15}$	$\frac{I,16}{I,16...I,17}$
	 Iн (45)	$\frac{I,03}{I,02...I,05}$	$\frac{I,18}{I,20...I,21}$	$\frac{I,17}{I,17...I,22}$
	 2	$\frac{0,96}{-}$	$\frac{I,26}{-}$	$\frac{I,06}{-}$
	 2в	$\frac{I,01}{I,00...I,02}$	$\frac{I,31}{I,29...I,33}$	$\frac{I,12}{I,10...I,21}$
	 2н (0)	$\frac{I,03}{-}$	$\frac{I,30}{-}$	$\frac{I,07}{-}$
	 2н (45)	$\frac{0,95}{-}$	$\frac{I,44}{-}$	$\frac{I,17}{-}$

p - расчет; э - эксперимент

Введение внутреннего (в) клина (Iв) различной структуры повышает частоты на 7...16%. Этого может быть недостаточно. Для устойчивости к изгибно-крутильному флаттеру необходима большая раздвоенная частот. Эффект наружного клина (Iн/у /) зависит от его структуры. Максимум крутильной частоты возникает при $\varphi = 45^\circ$ и равен 1,18.

Очень эффективен способ структурных изменений. В общем случае диапазон управления частотами путем изменения структуры материала $\bar{f}_{mn} = f_{mn}^* / f_{mn}^0$, где f_{mn}^* и f_{mn}^0 - собственные частоты при конечном и начальном значениях изменяемого структурного параметра, зависит от степени анизотропии КМ, граничных условий, закрученности профиля, его трапецевидности и клиновидности.

Предельно возможный диапазон изменения изгибных ($m0$), крутильных ($m1$) и пластиночных ($m2$) частот при варьировании структурных параметров равен

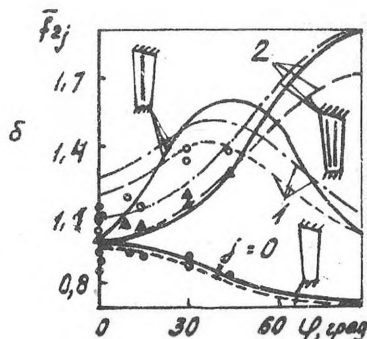
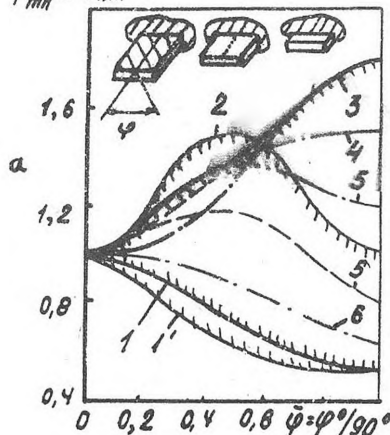
$$\bar{f}_{m0} = \bar{f}_0^* = (D_{22}^* \rho^0 / D_{22}^0 \rho^*)^{0.5}; \quad \bar{f}_0^* \leq \bar{f}_{m1} \leq \bar{f}_1^* = (D_{66}^* \rho^0 / D_{66}^0 \rho^*)^{0.5} \alpha;$$

$$\bar{f}_0^* \leq \bar{f}_{m2} \leq \bar{f}_2^* = (D_{11}^* \rho^0 / D_{11}^0 \rho^*)^{0.5},$$

где D_{22}, D_{11} - эффективная жесткость при изгибе вдоль длины и хорды лопатки соответственно; D_{66} - эффективная жесткость лопатки при кручении; ρ - эффективная плотность материала; α - коэффициент, учитывающий влияние побочных жесткостей $D_{16(26)}$, граничных условий и формы колебаний.

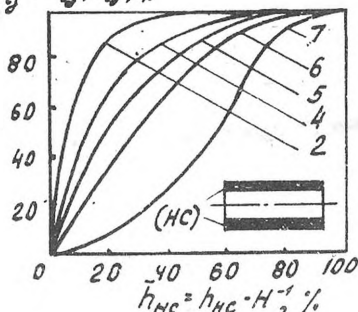
Область изменения спектра частот колебаний $\bar{f}_{mn}$ при варьировании удлинения и угла армирования пластины и лопатки представлена на рис. 2.3. С увеличением удлинения пластины $c = ab^{-1}$ верхняя граница диапазона изменения крутильных и пластиночных частот расширяется, достигая своего предельного значения теоретически при $c = \infty$. Однако практическая реализация предельных значений частот $\bar{f}_n^*$ ($n=0,1,2$) возможна при $c < 0,1$ и $c \geq 5,0$. Таким образом, при $c = 0,1 \dots 5,0$ удлинение пластины (лопатки) оказывает наиболее существенное влияние на диапазоны управления первыми частотами различных типов форм. Следует отметить, что наибольший эффект достигается, когда управляющими являются наружные слои, так как их вклад в общую жесткость пакета более существен (рис. 2.4). Для рассмотренной лопатки, содержащей 70% углеродной (У) ленты и 30%

$\bar{f}_{mn}^*$ и $\bar{f}_{mn}$

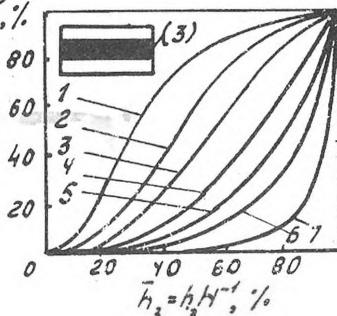


Р и с. 2.3. Предельный диапазон изменения частот колебаний пластин (ψ)_г (а) и влияние угла армирования $\pm \psi$ управляющих слоев (20% углеродных наружных слоев) на относительные частоты колебаний лопаток турбомашин (б): а - $\bar{f}_{01}^*$; $\bar{f}_{11}^*$; $\bar{f}_{21}^*$; $\bar{f}_{31}^*$; уточненная теория; б - $\bar{f}_{01}$; $\bar{f}_{11}$; $\bar{f}_{21}$; $\bar{f}_{31}$; уточненная теория стержней (—) и пластин (---); о, •, ▲ - эксперимент

$\bar{D}_{ij}^{HC} - D_{ij}^{HC}/D_{ij}^n, \%$



$\bar{D}_{ij}^3, \%$



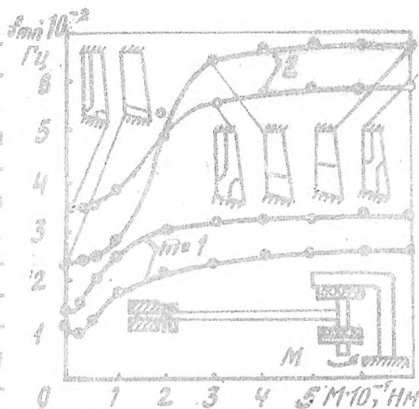
Р и с. 2.4. Вклад жесткости несущих слоев (НС) и заполнителя (3) $\bar{D}_{ij}^{HC(3)} = [1 + [\bar{A}_{ij}^{HC(3)} (\bar{h}_{HC(3)}^{-1})^{-1}]^{-1}]^{-1}$, где $\bar{A}_{ij}^{HC(3)} = A_{ij}^{HC(3)} / A_{ij}^{3(HC)}$; $\bar{h}_{HC} = 1 - \bar{h}_3$; $\bar{h}_3 = h_3/H$; в общую жесткость пакета при $\bar{A}_{ij}^{HC(3)} = 35(1)$; 10(2); 5(3); 2(4); 1(5); 0,5(6); 0,1(7)

отклонениями (σ) и имеющих удлинение $\sigma = 3$, видно, что при $\varphi = 30^\circ$ наружных слоев Y (20...25%) круговая частота возрастает на 26...35%, пластинчатая - на 6...18%. Изгибные частоты в силу изогнуто-сти пера снизились только на 3...5% (вместо 10...13% для плоской лопатки). Достаточна и раздвоенка частот в 170...200 Гц.

Возможности способа структурных изменений материала достаточно велики. Однако частотная отстройка может быть неэффективной, если не учитывается зависимость плотности спектра частот, близости и инверсии форм, демпфирующих и усталостных свойств конструкции от ее параметров.

Еще больший эффект дает конструктивно-структурный метод отстройки (см. табл. 2.1, 2и(45)).

С ростом жесткости заделки (момент M , рис. 2.5) частоты возрастают в 1,7...3 раза, а узловые линии смещаются к середине пера. Это весьма широкий диапазон изменения частот. Однако здесь следует исключить инверсию и кратность частот, расширяющих зону резонансных колебаний. Все методы, кроме метода структурных изменений, требуют затрат на оснастку или доработку узлов крепления.

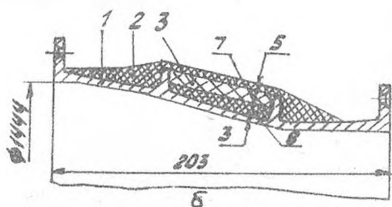
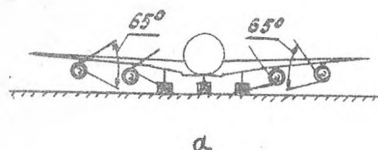


Р и с. 2.5. Влияние жесткости заделки лопатки на спектр собственных частот и формы колебаний композитной лопатки:
 $f = 0$ (—○—); I (—□—)

2.2.2. Защита корпусов от пробиваемости

В авиадвигателестроении уделяется большое внимание повышению надежности вращающихся узлов компрессора и турбины. Однако из-за различных причин (технологические дефекты, попадание в двигатель посторонних предметов, выход из строя подшипников и т.д.) наблюдаются случаи разрушения дисков и лопаток, вызывающие аварийные ситуации на летательных аппаратах. Согласно статистике, относящейся к трем широко применяемым за рубежом турбовентиляторным двигателям - CF6, JT9D и RB-211, за период 1978-1981 гг. на 10 млн. часов наработки приходится 6,3...6,5 случаев разрушения роторов без удер-

какие обломки корпусами двигателей /23/. Особенно опасными являются обрывы вентиляторных лопаток, имеющих большую массу. В связи с этим весьма актуальным для обеспечения безопасности полетов является решение проблемы непробиваемости корпусов под воздействием фрагментов разрушившегося ротора (рис. 2.6). Исследования в этом направлении интенсивно проводятся в различных странах.



Р и с. 2.6. Пример зон защиты самолета от осколков в плоскости вентилятора (а) и рабочее кольцо вентилятора, усиленное намоткой органоластика (б): 1 - кольцо из алюминиевого сплава; 2, 3 - кугт из органических волокон

При разработке защитных устройств учитывается кинетическая энергия осколков, однако их воздействие на корпус не является простым случаем столкновения предметов друг с другом. Для определения воздействия осколков на корпус необходимо знать:

начальную силу удара;

форму и состав как осколка, так и защитного приспособления;

величину зазора между концами лопаток и защитным приспособлением;

энергию, передаваемую осколком от следующей за ним лопатки (так называемый "ударный эффект").

Информация, достаточная для установления этих величин и соотношения между ними, отсутствует. Поэтому одним из методов создания защиты, обеспечивающей локализацию осколков, является подбор толщины корпусов с помощью пробных испытаний на разгонном стенде, в котором путем подрыва рабочей лопатки на заданной частоте вращения воспроизводятся реальные условия взаимодействия осколков с корпусом и другими лопатками.

Исследования проводятся в направлении создания новых ударопрочных материалов и конструирования защитных приспособлений. Разработан ряд вариантов защиты корпусов путем увеличения толщины стенок,

установки поясов жесткости, введением специальных устройств для разрушения сторвавшихся деталей на мелкие фрагменты. Нашла применение многослойная, и в частности двухслойная, металлическая броня для изготовления защитных колец с весьма высокой твердостью лицевого (со стороны удара) слоя и с высокой прочностью и вязкостью тыльного слоя. Однако применение традиционных металлических сплавов для защиты корпусов ГТД приводит к значительному, иногда недопустимому увеличению массы летательного аппарата. Поэтому современное авиадвигателестроение связывает создание надежных защитных приспособлений с применением керамических и ударопрочных полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Один из вариантов материала защитных колец /24/ представляет собой слоистый пластик, армированный стекловолокном, с небольшим содержанием смолы (25%). Керамический слой приклеивают к кольцу с помощью эпоксидной смолы. Лицевая сторона керамической плитки покрывается защитным противоосколочным слоем из нейлоновой ткани. Разрушение должно быть таким, чтобы осколки испытывали "мягкое" торможение броневое материала.

Возможны и другие конструктивные исполнения защитных экранов и колец.

В работе /25/ показана возможность применения защитных колец из органических волокон типа Кевлар. 75-100 слоев ткани из этих волокон (со связующим или без него) образуют кольцо толщиной около 40 мм и обеспечивают высокую стойкость к ударным воздействиям высокоэнергетических тел. Такая "облегченная" броня может быть получена и путем сочетания стеклянных и нейлоновых тканей.

Достаточно эффективное обеспечение непробиваемости корпуса вентилятора при разрушении вращающихся элементов ротора достигается усилением корпуса стеклопластиком.

Анализ конструкций и материалов защитных устройств показывает, что с помощью композиционных материалов может быть обеспечена надежная локализация разрушенных элементов ротора в аварийной ситуации. Применение стеклопластиков и органопластиков по сравнению с металлическим исполнением обеспечивает снижение массы защитных устройств на 25...30%.

2.2.3. Противопожарная защита

Для локализации титанового пожара в аварийных ситуациях используется противопожарная защита. Суть ее — нанесение огнестойких покрытий на поверхности корпусных деталей, расположенных над зоной возможного возгорания. Многочисленные эксперименты привели к выбору в качестве покрытия неметаллической композиции на каучуковой основе с огнестойким наполнителем.

2.2.4. Теплоизоляционная защита

Примером успешного применения КМ в авиационных двигателях является теплоизоляционная защита воздухопроводов системы отбора воздуха на кондиционирование, антиобледенение и т.д. Титаностеклопластиковые трубы по сравнению с трубами из $Ti +$ асбест обладают повышенной прочностью, меньшей на 30% массой и большей эффективностью (перепад температур увеличивается на 90°).

Для тепловой защиты турбинных лопаток ГТД используются керамические покрытия, которые, являясь термобарьером М, снижают температуру и увеличивают ресурс лопатки.

2.2.5. Электроизоляционная защита проводов

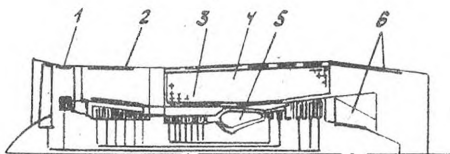
Применение защиты электропроводов, состоящей из стеклочулка и герметика 5I-Г-I, по сравнению с алюминиевыми экранами снижает массу, уменьшает в 1,5 раза трудоемкость и в 5 раз стоимость.

2.2.6. Уплотнение

Чрезвычайно важное направление КМ — применение их в качестве слоя между рабочими лопатками и статором. В соответствии с условиями эксплуатации этот материал должен легко стираться и не вызывать износа лопаток, не подвергаться воздействию эрозии в скоростном потоке, обладать хорошей адгезией к металлу, иметь достаточную прочность при большом количестве теплосмен и быть технологичным. Таким материалом оказался композит алюминий + нитрид бора. Его работоспособность сохраняется при температуре до $600^{\circ}C$. Применение уплотнения позволило уменьшить радиальные зазоры и, следовательно, удельный расход топлива.

2.2.7. Шумоглушение

В связи с требованиями по ограничению уровня излучаемого шума на современных газотурбинных двигателях для облицовки газозаборного канала широко применяются звукопоглощающие конструкции (ЗПК). Наиболее полно требованиям эффективного шумоглушения удовлетворяют ЗПК с применением сотового заполнителя. В зависимости от месторасположения (рис. 2.7) ЗПК работают в различных условиях. ЗПК, расположенные в зоне вентилятора, находятся в условиях интенсивного вибрационного нагружения. В пожароопасной зоне работают ЗПК для оболочек наружного контура. Звукопоглощающие конструкции для створок реверса подвержены (хотя и кратковременно) тепловому и аэродинамическому нагружению. В условиях повышенных температур работают ЗПК выходного устройства.



Р и с. 2.7. Расположение звукопоглощающих конструкций в ГТД: 1 - корпус за вентилятором; 2 - оболочка наружного контура; 3 - обтекатель компрессора; 4 - створка реверсивного устройства; 5 - обтекатель камеры сгорания; 6 - выходное устройство

В настоящее время в ГТД нашли применение освоенные промышленностью металлические (стальные, титановые и реже алюминиевые) ЗПК. Однако все они обладают существенными недостатками. Стальные ЗПК имеют большую массу. Область применения титановых ЗПК ограничена их пожароопасностью. У алюминиевых ЗПК мал уровень вибропрочности. Кроме того, из-за сложности технологического процесса сварные стальные и титановые ЗПК имеют высокую стоимость изготовления. В связи с этим возникла необходимость в выборе материалов, обеспечивающих выполнение различных требований, предъявляемых к ЗПК и обусловленных многофункциональным назначением таких конструкций. ЗПК должны:

осуществлять эффективное звукопоглощение от широкополосного источника шума;

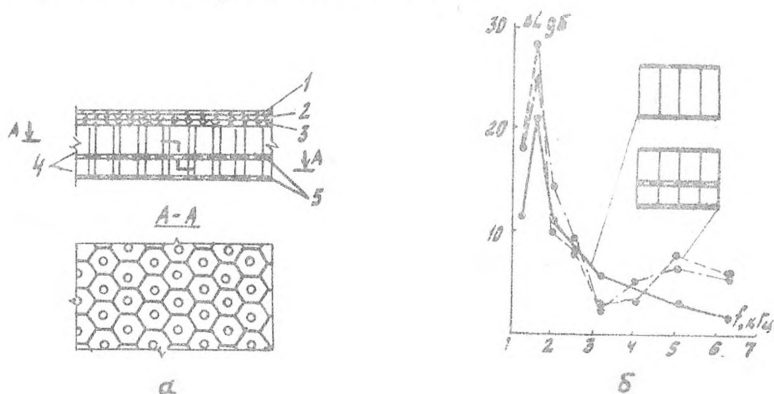
иметь малый вес, обладать достаточной статической прочностью и жесткостью с целью использования их и в качестве силовых конструкций (при этом возможны локальные нагрузки от узлов крепления агрегатов);

иметь повышенную вибропрочность, в том числе в диапазоне акустических частот (до 10...15 кГц);

быть пожаробезопасными и обладать локализирующей способностью в случае возникновения пожара;

сохранять работоспособность в течение длительного ресурса в диапазоне температур $-60^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$.

Материал для ЗПК ГТД должен обладать стойкостью к воздействию авиационных топлив, масел, бензина, воды и не должен поглощать их. Необходимо, чтобы он допускал контакт и не корродировал со сталями, титановыми и алюминиевыми сплавами, а также обладал биологической (к грибкам, микробам) и эрозионной стойкостью и стойкостью к дегазирующим, дезактивирующим веществам. При создании ЗПК следует учитывать технологичность и трудоемкость изготовления, а также серийность производства материала.



Р и с. 2.8. Элемент оболочки наружного контура ГТД, выполненной с применением стеклосотового заполнителя (а), и эффективность звукопоглощения различных ЗПК (б): а - 1 - несущая титановая оболочка; 2 - герметик; 3 - стеклопластик Т-10-80+СП-97К; 4 - стеклоткань; 5 - перфорированные титановые листы; б - трехслойные ЗПК из титана (—); пятислойные с тканями (---) и клееными (— · — · —) сотами

Наиболее полно удовлетворить перечисленным требованиям могут современные композиционные материалы. Для изготовления сотового заполнителя, как показали исследования, целесообразно, в частности, применение стеклопластика /26/. Один из вариантов обо-

лочки наружного контура ГТД, выполненный с применением стеклосотов, изображен на рис. 2.8. ЗПК представляет собой пятислойную клееную (клей БК-36) конструкцию, состоящую из перфорированной обшивки и перегородки из сплава ОТ-4-1 толщиной 0,3 мм. Титановый сплав используется с целью обеспечения эрозионной стойкости ЗПК. Другой несущий слой изготовлен из стеклопластика. Высота слоев стеклосотов, степень перфорации, форма и размеры ячейки сотов - все это выбирается исходя из акустических требований. Стеклосотовые блоки могут быть изготовлены с применением клееных и тканых (ТССП-7-10П) сотов методом прямого прессования. ЗПК получают методом вакуумного формования. Технология изготовления должна исключать искажение формы сотов, разрыв стенок ячеек, расслоение в местах склеивания и другие дефекты.

Набор панелей ЗПК устанавливается в силовую оболочку, выполненную из листа титанового сплава толщиной 1,2 мм. Между ЗПК и несущей оболочкой располагается слой ($\delta = 0,8$ мм) герметика. Расположение герметика между жесткими слоями обеспечивает возникновение в нем при изгибе значительных деформаций поперечного сдвига. Это приводит к существенному повышению демпфирующей способности и, как следствие, к росту вибропрочности конструкции.

Сравнительные акустические испытания (рис. 2.8,б) трехслойных титановых и пятислойных композиционных ЗПК одинаковой толщины ($H = 25$ мм) показали, что в диапазоне частот 1,2...1,8 кГц и 4,5...6,3 кГц ЗПК из КМ эффективнее титановых на 4...5 дБ.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Важнейшим этапом создания элементов конструкции из КМ является проектирование, которое вследствие анизотропии и неоднородности материала, обилия структур его армирования становится более сложным и базируется на новых принципах конструирования.

3.1. Основные принципы конструирования

Принципы конструирования элементов из композиционных материалов вытекают из специфики их свойств (анизотропия и неоднородность физико-механических свойств; относительно низкая жесткость и прочность при межслойном сдвиге, поперечном обрыве и смятии; низкая эрозионная стойкость; существенное различие свойств компонентов и др.), способов переработки КМ и технологии изготовления деталей. Основными общими принципами являются следующие /4, 27, 28/.

1. Обеспечение единства при конструировании материала, проектировании конструкции и создании технологии изготовления. Все этапы создания конструкций из КМ тесно связаны между собой.

2. Исключение (уменьшение) трансверсальных и термических напряжений. Это достигается, например, увеличением поверхности передачи контактной нагрузки, обеспечением свободы термических деформаций за счет консольного крепления элементов или крепления с помощью плавающих соединений.

3. Совмещение поля сопротивления материала с полем действующих нагрузок. Используя анизотропию и неоднородность свойств КМ путем распределения наполнителей по объему детали и выбора углов армирования, реализуем этот принцип. Поля статической прочности и вибропрочности согласуются с полями статических и динамических нагрузок соответственно.

4. Объединение деталей. Необходимо стремиться к изготовлению сразу несколько деталей. Это уменьшает количество узлов крепления, увеличивает размерность отдельного композиционного элемента и повышает эффективность применения КМ.

5. Обеспечение плавной формы элемента. Деталь из КМ должна иметь плавные очертания. Радиус сопряжения ее поверхностей не должен быть меньше допустимого для данного наполнителя (волокна, ленты) значения.

6. Обеспечение непрерывного армирования. Армирующие элементы по возможности должны быть непрерывными. Если и имеются разрывы (прерывание), то они должны быть в минимально нагруженной зоне детали.

7. Обеспечение совместимости материалов (различных КМ и металлов). При конструировании элементов из КМ, узлов крепления и сочленения, защитных покрытий и др. необходимо согласовать деформа-

ционные и прочностные свойства, коэффициенты температурного расширения и теплопроводности и др.

Таковы основные принципы конструирования элементов из КМ, которые в каждом отдельном случае реализуются в виде конкретных рекомендаций по рациональной структуре армирования, оптимальному конструктивному исполнению элементов и узлов креплений, оптимизации технологии изготовления.

3.2. Основные этапы проектирования конструкций из композиционных материалов

Упрощенная схема процесса проектирования состоит из следующих основных этапов (рис. 3.1) /29, 30/.

1. Определение назначения детали, задание геометрии и технических требований к материалу и детали, уровня и характера нагрузок, температуры и т.п. Исходя из этих данных выбирается тип КМ и метод изготовления конструкции. Устанавливаются в первом приближении свойства монослоев и структура армирования КМ.

2. Определение компонентов монослоя, его физико-механических и технологических характеристик. Задаются структурные параметры КМ (степень армирования, пористость, свойства компонентов) и назначаются технологические режимы формирования.

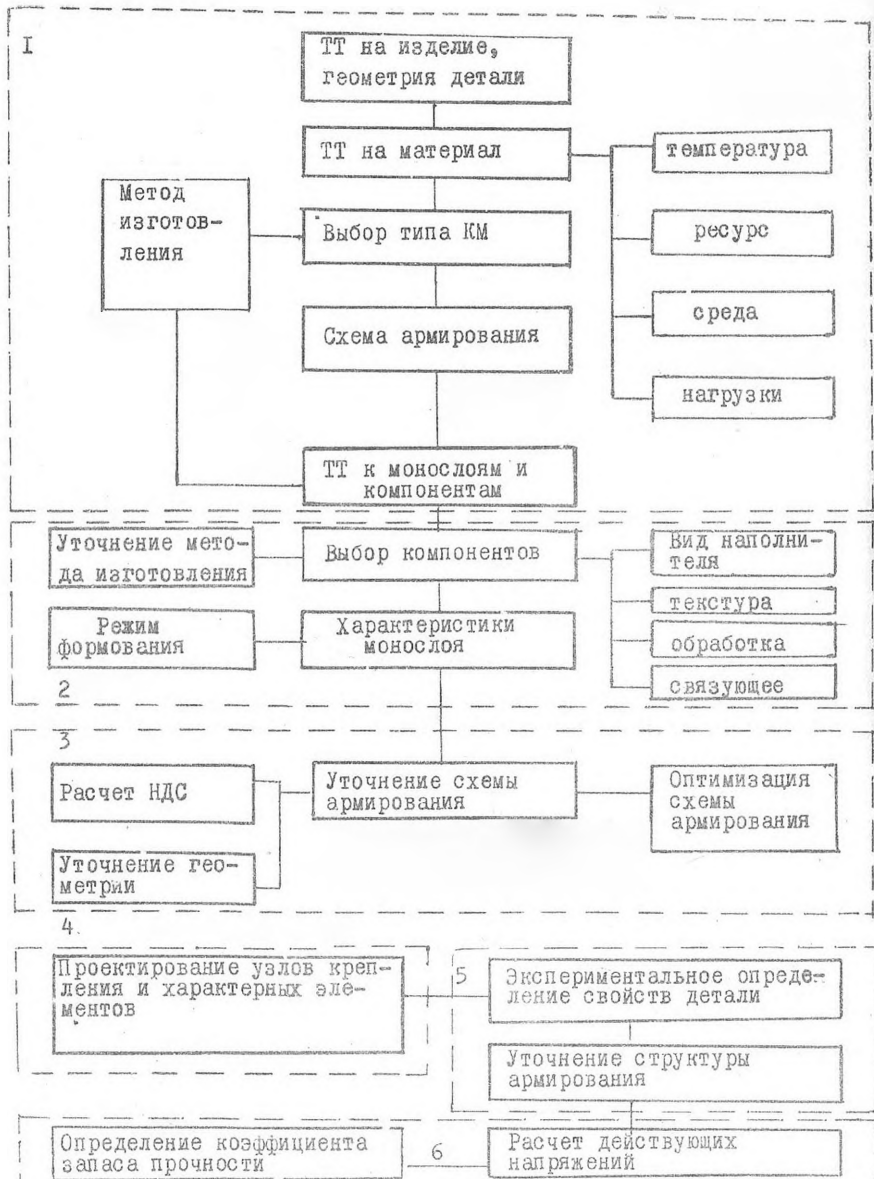
3. Уточнение схемы армирования. Расчет напряжений в детали и монослоях.

4. Выявление всех фактических взаимосвязей между деталью и конструкцией. Проектирование узлов крепления, характерных элементов типа лючков, фланцев и т.д.

5. Экспериментальное определение свойств конструкции и ее работоспособности. Уточнения и изменения в конструкции детали и структуре армирования.

6. Расчет детали на прочность и определение коэффициента запаса прочности.

Как правило, процесс проектирования конструкций из КМ носит итерационный характер. Это обусловлено ограниченным опытом применения КМ, обилием взаимосвязанных структурных, конструктивных и технологических параметров, сложностью учета условий эксплуатации при расчете, технологических отклонений и других факторов.

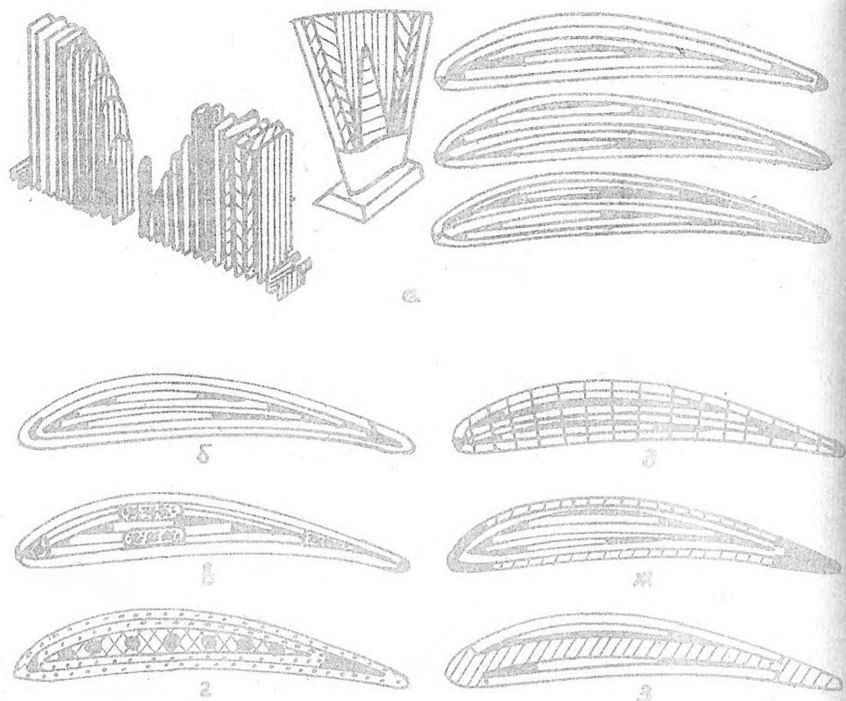


Р и с.3.1. Схема проектирования конструкций из композиционных материалов

3.3. Конструирование композиционных лопаток компрессоров ГТД

Важнейшим этапом создания лопаток из КМ является их проектирование. Оно включает разработку узла крепления, формы пера лопатки и конструкции материала. Проектирование лопатки осуществляется с учетом предъявляемых к ней требований и специфики свойств композиционных материалов. Конструирование лопатки и ее материала — это единый взаимосвязанный процесс. Исходя из условий эксплуатации, следует учитывать, что лопатки должны обладать, кроме аэродинамического совершенства, высокой жесткостью и прочностью при изгибе и кручении, достаточной вибропрочностью, необходимой ударной вязкостью и эрозионной стойкостью. Условия работы КМ в узлах крепления требуют от них также достаточной контактной прочности и прочности на поперечный сдвиг. Причем лопатка должна быть работоспособной при длительной эксплуатации в заданных климатических условиях (рабочая температура, влажность и т.д.). К этим требованиям следует добавить требования к качеству изготовления лопаток: отсутствие колебаний, непрочная, исправления и разориентации волокон, снижение остаточных напряжений. Таким образом, к конструкции лопатки и ее материалу предъявляются различные и достаточно высокие требования. Разнообразие КМ и возможность управления их свойствами в широком диапазоне позволяют создавать и более рациональные конструкции лопаток. Однако наряду с известными положительными свойствами композиционные материалы, являясь анизотропными, обладают недостаточными жесткостью и прочностью при поперечном сдвиге и отрыве, контактной прочностью, эрозионной стойкостью и ударной вязкостью. Поэтому разработка рациональной конструкции лопатки возможна при комплексном решении вопросов материаловедения, технологии изготовления и механики.

Требованиям к материалу лопатки компрессора наиболее полно отвечают такие композиционные материалы, как стеклоуглепластик и бореалюминий. Стеклоуглепластик сочетает высокие жесткостные и прочностные свойства с достаточной ударной вязкостью. Чистый же углепластик, являясь высокомолекулярным и высокопрочным материалом (см. табл. I.6), имеет низкую ударную вязкость. С точки зрения жесткости и прочности целесообразно иметь в структуре армирования 70...75% углеродной ленты и 25...30% стеклоткани. При этом



Р и с. 3.2. Раскрой материала и сечение лопаток, изготовленных из композиционных материалов

возможны различные варианты конструкции пера лопатки (рис. 3.2). Отдельные слои лопатки могут укладываться эквидистантно ее наружным поверхностям, срединной поверхности или комбинированным способом (см. рис. 3.2, а). Повышенное содержание армирующих элементов в наружных слоях и связующего в центральной части лопатки (в зоне максимальных напряжений межслойного сдвига) является благоприятным для восприятия изгибных и крутильных нагрузок. Для реализации шестого основного принципа конструирования могут применяться оборотные слои (см. рис. 3.2, б). Структура лопатки может содержать кроме слоев еще

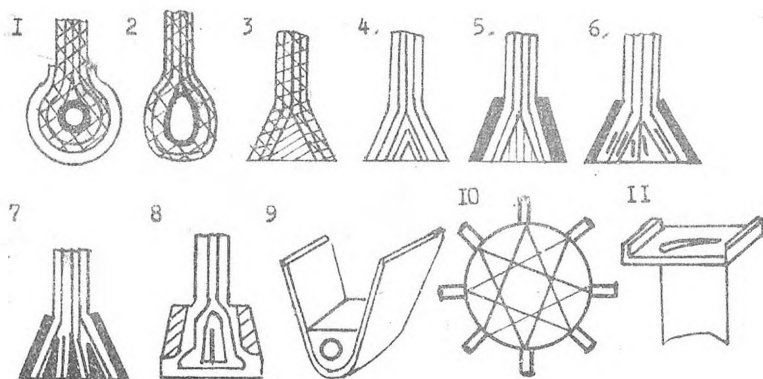
и полок (рис. 3.2,в), металлическую или полимерную вставку (см. рис. 3.2,г,з), антиэрозионное покрытие (рис. 3.2,к), армирующие элементы в третьем направлении (рис. 3.2,д).

Структура армирования (характер расположения слоев и их углы армирования) определяется уровнем действующих нагрузок, формой и размерами лопатки. В качестве общих рекомендаций отметим следующее. Внутренние слои рабочей лопатки целесообразно армировать вдоль ее оси для восприятия центробежных сил. Наружные слои, работающие на изгиб вдоль длины и хорды (за счет изогнутости профиля) и кручение, должны иметь углы армирования $\varphi = 0... \pm 45^\circ$. Большие углы армирования соответствуют удлиненным лопаткам с большей изогнутостью и закрученностью профиля. Необходимо отметить, что структура армирования должна обеспечивать "эффективную ортотропию материала" (минимум эффективных побочных жесткостей $D_{\text{сб}}$). Это исключает коробление профиля при изготовлении и термообработке и уменьшает изгибно-крутильную связанность деформаций.

В целях повышения ударной прочности кромок (возможно попадание в тракт ГТД посторонних предметов - птиц, кусков льда, градин и т.п.) применяется их оковка, например, из стальной фольги или никелевой сетки, которая после одевания на слоистую таблетку-заготовку пера запрессовывается /31/. Для повышения ударной вязкости возможно добавление органического волокна, сплава титана или бор-алюминия. Полимерные композиционные материалы имеют низкую стойкость к эрозионному износу, и применение их для лопаток ГТД без специальной закупки невозможно. Обычно используют эластомерное эрозионно-стойкое покрытие.

В соответствии с пятым принципом конструирования радиусы входных и выходных кромок, а также перехода от пера к замку должны быть больше, чем для металлических лопаток. Наименьший допустимый радиус выходной кромки равен 0,6...0,7 мм. Форма пера лопатки должна быть плавной, без резких изменений толщины. В этом случае нет перегибов и разрушения волокон /18, 27/.

Разработка работоспособного узла крепления - важный этап создания лопаток из КМ. Замок крепления рабочих лопаток к диску компрессора и направляющих лопаток имеет различную конструкцию (рис. 3.3) /18, 31, 32/. Шарнирный замок с цилиндрическим, эллипсоидным и каплевидным пальцами обеспечивает замыкание волокон (шестой принцип конструирования). Однако он имеет либо дефекты, свя-



Р и с. 3.3. Возможные конструкции и узлы крепления лопаток из КМ

занные с разрушением волокон при резких перегибах, либо большие габариты (см. рис. 3.3, поз. 1, 2). Более удовлетворительным решением является замок типа "ласточкин хвост" (типы 3, 4, 5, 6, 7). Здесь возможно различное расположение металлических и композиционных клиньев. Замок с цельным клином 3 менее прочный, так как под действием центробежных сил происходит отслоение клина и лопатка может вылететь из паза (нарушен седьмой принцип конструирования). Примерно в 2...3 раза прочнее по сравнению с предыдущим типом замок с несколькими металлическими клиньями (тип 4). Для предотвращения смятия боковые поверхности должны быть усилены металлическими (титановыми) накладками и иметь достаточную площадь. Лучшие результаты достигаются при равномерном расклинивании материалом, совместимым с материалом пера лопатки (тип 6, 7). Возможно применение Т-образного замка, если обеспечивается бездефектное замкнутое армирование в комлевой части пера (тип 8). Весьма эффективным может быть замок типа 9 для сдвоенной лопатки, где осуществляется замкнутое армирование и изгиб волокон происходит по большому радиусу.

При разработке компрессора из КМ можно исключить соединение лопаток с диском (тип 10). Такая конструкция обеспечивает работу КМ на растяжение. Учитывая высокие свойства КМ в направлении армирования, следует отметить, что наиболее целесообразным являются элементы и узлы крепления типа фермы и рам.

Крепление лопаток направляющего аппарата из ПКМ можно осуществить с помощью титановых полок (см. рис. 3.3, поз. II).

В заключение необходимо отметить следующее. При проектировании узлов крепления ввиду малой контактной прочности КМ следует увеличивать поверхность передачи нагрузки. Однако это увеличение, а также обеспечение требуемой жесткости конструкции порою вызывают необходимость увеличения ее толщины, что повышает опасность разрушения от поперечного сдвига (расслоения) и поперечного отрыва. Уменьшить эту опасность можно путем стягивания пакета в замке болтами, штифтами, работающими на срез. Этому способствует наличие меньшей склонности КМ к концентраторам напряжений.

4. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лопатки компрессора и турбины являются наиболее нагруженными и ответственными деталями, определяющими надежность двигателя в целом. При работе двигателя лопатки подвержены воздействию статических, динамических и температурных нагрузок. Расчетное определение динамических напряжений, вызываемых колебаниями лопаток, затруднительно, поэтому величину их обычно получают экспериментально. Температурные напряжения в лопатках обусловлены их неравномерным нагревом. Распределение температуры по сечению лопатки зависит от режима работы двигателя. Температурные напряжения в лопатках обычно не рассчитываются из-за сложности аналитического решения, а влияние их на прочность учитывается при выборе запаса прочности.

Таким образом, расчет на прочность лопаток производится исходя только из статических нагрузок. Для рабочих лопаток такими нагрузками являются центробежные силы, возникающие при вращении ротора, и газовые силы, возникающие при обтекании профиля лопатки газовым потоком. Направляющие и сопловые лопатки нагружены газовыми силами. Центробежные силы вызывают деформации растяжения, изгиба и кручения, газовые — деформации изгиба и кручения.

Сложность расчета на прочность композиционных лопаток, в отличие от металлических, связана с необходимостью учета неоднородности и анизотропии свойств материала. Неоднородность свойств обус-

полнена слоистой структурой материала лопатки. При этом слои могут быть изготовлены из различных КМ и армированы под разными углами, что влияет на уровень и характер анизотропии. Форма и размеры слоя зависят от его месторасположения и размеров лопатки.

Целью расчета является определение действующих напряжений в расчетных сечениях, исследование распределения напряжения по длине и толщине лопатки, установление ее работоспособности путем послойной оценки коэффициента запаса, анализ механизма разрушения и разработка при необходимости мероприятий по обеспечению требуемого запаса прочности.

4.1. Методика расчета на прочность рабочей лопатки ГТД

При расчете рабочей лопатки на прочность относительно ее геометрии, кинематических и физических соотношений, режима обтекания лопатки воздухом и граничных условий принимаются следующие допущения:

геометрические - лопатка рассматривается как естественно закрученный стержень; кинематические - выполняются условия жесткого контакта на границах слоев и справедлива гипотеза плоских сечений; физические - материал лопатки подчиняется закону Гука (отдельный слой является однородным и ортотропным с произвольным углом армирования; температурные напряжения отсутствуют, а температура постоянна по сечению и может изменяться только по длине лопатки); режим обтекания - интенсивность газовых (воздушных) сил по высоте лопатки постоянна и равна ее значению на среднем радиусе; граничные условия - консольное жесткое зацепление лопатки в ободу диска.

Исходные данные для расчета лопаток ГТД на прочность берут из газодинамического расчета и принятой конструкции материала лопатки. К ним относятся:

- $R_{1(2)}$ - радиус корневой (периферийной) сечения лопатки;
- ω - частота вращения ротора;
- $P_{1(2)}$ - давление воздуха (или газа) на входе (выходе) в межлопаточный канал (из межлопаточного канала);
- $C_{1a(2a)}; C_{1u(2u)}$ - осевая и окружная составляющие скорости воздуха на входе (выходе) соответственно;
- G - секундный массовый расход воздуха;

- z, l - число и длина лопаток рабочего колеса соответственно;
 R_p, r_c - радиус колеса и средний радиус лопатки соответственно;
 ρ_i, E_i, G_i - плотность, модуль Юнга в направлении оси лопатки и модуль сдвига в плоскости i -го слоя соответственно;
 $\sigma_{\delta}^i(\sigma_{\delta,2}^i)$ - предел прочности (ползучести) материала при растяжении i -го слоя в направлении оси лопатки;
 h_i - толщина i -го слоя лопатки;
 τ_{δ}^i - предел прочности при сдвиге материала в плоскости i -го слоя;
 $\tau_{\delta m}^i$ - предел прочности материала при межслойном сдвиге.

Кроме того, для расчета необходимо иметь профили в нескольких расчетных сечениях, положения этих профилей в решетке, углы их установки γ и данные о распределении температур по длине лопатки. Упругие (прочностные) свойства каждого слоя лопатки определяются через свойства отдельного ортотропного слоя $E_0^i, E_{90}^i, \mu_{12}^i, G_{12}^i (\sigma_0^i, \sigma_{90}^i, \tau_{12}^i)$ и угол его армирования φ_i (см. формулы (I.4) и (I.6)). При этом свойства отдельного слоя могут быть установлены экспериментально или расчетным путем по значениям свойств компонентов $E_{H(C)}, G_{H(C)}, \mu_{H(C)}$ ($\sigma_{H(C)}, \tau_{H(C)}$) и их объемного содержания $V_{H(C)}$ (см. главу I).

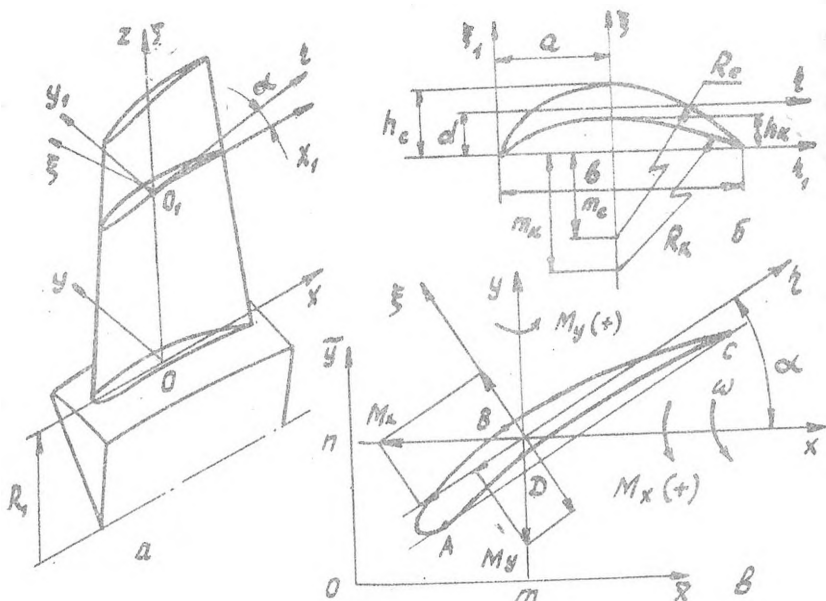
Напряжение - деформированное состояние естественно-закрученных металлических лопаток - наиболее полно изучено в работах /33, 34/. Применение данного подхода к расчету лопаток из КМ требует учета различия в упругих свойствах слоев, т.е. слоистости материала. Это привело к необходимости использовать не геометрические характеристики поперечных сечений, а физико-геометрические, зависящие от свойств и конструкции каждого слоя /35/.

При расчете лопатки используется прямоугольная правая система координат, представленная на рис. 4.1, а, начало которой лежит в центре тяжести корневого сечения. Ось X направлена по потоку воздуха вдоль оси двигателя, ось Z - перпендикулярна оси вращения ротора, ось Y расположена в плоскости вращения и при кратчайшем повороте в направлении вращения лопатки совпадает с осью Z .

Условия равновесия отсеченной части лопатки имеют вид

$$\begin{aligned}
 \int_F \sigma dF &= P; & -M_{kr}^y + \int_F \sigma s^2 \theta dF &= M_{kr} \rho; \\
 \int_F \sigma \xi dF &= -M_\eta; & \int_F \sigma \eta dF &= -M_\xi,
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

где σ - нормальное напряжение в точках поперечного сечения; ρ -



Р и с. 4.1. Система координат лопатки (а), аппроксимация профиля (б) и действующие в сечении лопатки компрессора изгибающие моменты (в)

центробежная сила лопатки, действующая на данное сечение; M_z, M_ξ — изгибающие моменты от газовых и центробежных сил относительно приведенных главных осей поперечного сечения η и ξ ; $M_{кр}^s$ — крутящий момент от центробежных сил; $M_{кр}$ — полный крутящий момент, вызывающий раскрутку профиля; $\theta = d\alpha/dr$ — относительный угол естественной (начальной) закрутки поперечного сечения; $S = (\xi^2 + \eta^2)^{0.5}$ — расстояние от центра тяжести до текущей точки сечения; F — площадь поперечного сечения.

Напряженное состояние стержня предполагается одномерным. Тогда в соответствии с принятыми кинематическими и физическими гипотезами нормальное напряжение, действующее в точках поперечного сечения,

$$\sigma = E\varepsilon = E(\varepsilon_0 - \alpha_\eta \eta - \alpha_\xi \xi - S^2 \theta \frac{d\varphi}{dr}). \quad (4.2)$$

Здесь ε_0 — деформация растяжения оси лопатки; α_η и α_ξ — сос-

табляющие кривизны; $\frac{d\varphi}{dr}$ - относительный угол упругой раскрутки.

Отметим, что второе и третье слагаемые уравнения (4.2) характеризуют линейно изменяющиеся (в силу гипотезы плоских сечений) деформации, связанные с изгибом лопатки, а четвертое слагаемое - деформацию за счет раскрутки профиля при растяжении лопатки под действием сосредоточенной силы.

Неизвестные параметры ε_0 , ε_2 , ε_φ и $d\varphi/dr$ определяются из условий равновесия (4.1). Подставляя в них формулу (4.2), используя приведенные главные оси η , ξ и учитывая, что $d\varphi/dr = M_{kr} \bar{T}$, можно получить следующие выражения [35]:

$$\frac{d\varphi}{dr} = (q - \theta^2 \bar{J}_p^{-1} \bar{F}^{-1}) (p \theta \bar{J}_p \bar{F}^{-1} - M_\xi \theta \bar{J}_{p\xi} \bar{J}_\xi^{-1} + M_\eta \theta \bar{J}_{p\eta} \bar{J}_\eta^{-1} - M_{kr}^4);$$

$$\sigma = E [\varepsilon_0 - M_\xi \bar{J}_\xi^{-1} \eta + M_\eta \bar{J}_\eta^{-1} \xi - \theta \frac{d\varphi}{dr} (S^2 - \bar{J}_{p\eta} \bar{J}_\eta^{-1} \xi - \bar{J}_{p\xi} \bar{J}_\xi^{-1} \eta)], \quad (4.3)$$

где $\varepsilon_0 = (q \bar{F} \theta^{-2} - \bar{J}_p^{-1}) (q p \theta^{-2} - M_\xi \bar{J}_p \bar{J}_{p\xi} \bar{J}_\xi^{-1} + M_\eta \bar{J}_p \bar{J}_{p\eta} \bar{J}_\eta^{-1} - M_{kr}^4 \bar{J}_p \theta^{-1})$;
 $q = \bar{T} - \theta^2 (\bar{J}_{p\xi}^2 \bar{J}_\xi^{-1} + \bar{J}_{p\eta}^2 \bar{J}_\eta^{-1} - \bar{J}_{kp})$;
 $\bar{J}_p = \int_F E S^2 dF$ - физический полярный момент инерции; $\bar{J}_{kp} = \int_F E S^4 dF$ - физический полярный момент инерции 4-го ранга; $\bar{J}_\eta = \int_F E \eta^2 dF$ и $\bar{J}_\xi = \int_F E \xi^2 dF$ - физические моменты инерции относительно приведенных главных осей; $\bar{J}_{p\xi} = \int_F E \eta S^2 dF$ и $\bar{J}_{p\eta} = \int_F E \xi S^2 dF$ - физические полярно-осевые моменты инерции; $\bar{T} = \int \theta T dF$ - физическая жесткость на кручение; $T = 2[-\xi_1^2 + \xi_1 [\xi_1(\eta_1) + \xi_2(\eta_1)] - \xi_1(\eta) \xi_2(\eta)]$ (рис. 4.1, б); $\bar{F} = \int_F E dF$ - физическая площадь сечения.

Касательные напряжения тангенциального ($\tau_{2\xi}$) и поперечного ($\tau_{2\eta}$) сдвигов определяются по формулам

$$\tau_{2\xi} \approx 2\theta \frac{d\varphi}{dr} \xi; \quad \tau_{2\eta} \approx \theta \sigma S. \quad (4.4)$$

Для приближенной оценки НДС лопаток из КМ, а также при малой закрутке пера при определении σ можно принять $\theta \approx 0$; $d\varphi/dr \approx 0$; $M_{kr}^4 \approx 0$.

Тогда из формулы (4.3) получим

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_u; \quad \sigma_p = E \varepsilon_0; \quad \sigma_u = E (\varepsilon_{u,2} - \varepsilon_{u,\varphi}), \quad (4.5)$$

где $\varepsilon_0 = p \bar{F}^{-1}$; $\varepsilon_{u,2} = M_\eta \bar{J}_\eta^{-1} \xi$; $\varepsilon_{u,\varphi} = M_\xi \bar{J}_\xi^{-1} \eta$.

Видно, что в этом случае напряжения от каждого силового фактора (центробежной силы, изгибающих моментов) можно определить независимо друг от друга. На основе формулы (4.5) можно ввести эффективные уп-

ругие свойства - свойства такого однородного (эффективного) материала, которые обеспечивают при одинаковых нагрузках деформации, аналогичные деформациям в слоистом КМ. Эффективные упругие свойства при растяжении $\langle E \rangle$ и изгибе $\langle E_\xi \rangle$ и $\langle E_\eta \rangle$ в этом случае определяются по формулам

$$\langle E \rangle = F^{-1} \bar{F}; \quad \langle E_\xi \rangle = J_\xi I_\xi^{-1}; \quad \langle E_\eta \rangle = J_\eta I_\eta^{-1}, \quad (4.6)$$

где $I_\eta = \int_F \eta^2 dF$ и $I_\xi = \int_F \xi^2 dF$ - осевые моменты инерции.

При анализе распределения модуля упругости по хорде данного сечения удобно использовать эффективный модуль в виде

$$\langle E_j \rangle = \sum_{i=1}^K E_i \bar{h}_i, \quad (4.6')$$

где $\bar{h}_i = h_i / c_j$; c_j, K - относительная толщина j -го слоя, толщина профиля и число слоев в j -м сечении профиля соответственно.

Таким образом, напряжения в лопатке определяются действующими нагрузками и физико-геометрическими параметрами сечений, зависящими от упругих свойств слоев, их конфигурации и месторасположения.

Определение приведенных главных осей и физико-геометрических параметров сечения. Приведенные главные оси сечения η, ξ - это оси, относительно которых выполняются условия

$$\int_F E \xi dF = 0; \quad \int_F E \eta dF = 0; \quad \int_F E \eta \xi dF = 0.$$

Первые два условия определяют приведенный центр тяжести сечения, третье - угол поворота осей η, ξ относительно выбранной произвольной системы координат.

Положение осей η, ξ (рис. 4.1, в) устанавливается на основе следующих соотношений [36]:

$$m = \bar{F}^{-1} \int_F E \tilde{x} dF; \quad n = \bar{F}^{-1} \int_F E \tilde{y} dF; \quad \operatorname{tg} 2\alpha = 2J_{x_1 y_1} (J_{x_1} - J_{y_1})^{-1},$$

где $J_{x_1 y_1} = \int_F E x_1 y_1 dF$ - физический центробежный момент инерции.

Из двух полученных значений угол α выбирается тот, для которого ось η является минимальной осью инерции. Определение параметров сечения с учетом слоистости материала возможно различными способами.

I. При непосредственном интегрировании профиль сечения лопатки описывается одним из способов, например дугами окружностей $R_{C(K)}^2 = (\eta_1 - \bar{a})^2 + (\xi_1 + m_{C(K)})^2$, проведенных из различных центров, или парабол (см. рис. 4.1, б)

$$\xi_1^{C(K)} = 4h_{0(K)} \bar{\eta}_1 (1 - \bar{\eta}_1), \quad (4.7)$$

где $\bar{\eta}_1 = \eta_1 \delta^{-1}$. Учитывая формулы преобразования координат, можно получить $\xi_{C(K)} = \xi_{C(K)}(\eta)$, где $C(K)$ - спинка (корытце). Тогда физико-геометрические параметры сечения определяются путем послонного интегрирования, например: $J_{\xi} = \int_P E \xi^2 dF = \sum_{i=1}^n E_i \int_{\eta_{1,i}}^{\eta_{2,i}} \int_{\xi_i}^{\xi_{i+1}} \xi^2 d\xi d\eta$,

где $\xi_i (i < S) = \xi_K + \sum_{j=1}^{i-1} h_j$; $\xi_i (i > S) = \xi_C - \sum_{j=1}^n h_j$; $\xi_1 = \xi_K(\eta)$; $\xi_{n+1} = \xi_C(\eta)$;

S - номер слоя, в котором расположена срединная линия профиля сечения.

2. Для вычисления интеграла по конечному промежутку $[a, \delta]$ может быть использована квадратурная формула Ньютона-Котеса, и в частности формула Симпсона:

$$\int_a^{\delta} f(x) dx = \sum_{k=0}^{N-1} \int_{x_{2k}}^{x_{2k+2}} f(x) dx \approx \frac{e}{3} \sum_{k=0}^{N-1} [f(x_{2k}) + 4f(x_{2k+1}) + f(x_{2k+2})], \quad (4.8)$$

где $2N$ - число частных промежутков $[x_i, x_{i+1}]$, $i=0, \dots, 2N-1$ длиной $e = (\delta - a) / 2N$.

В соответствии с формулой (4.8) физическая площадь сечения, например, равна

$$\bar{F} = \frac{e}{3} \sum_{k=0}^{N-1} \left(\sum_{j=1}^{n_{2k}} E_j h_j + 4 \sum_{j=1}^{n_{2k+1}} E_j h_j + \sum_{j=1}^{n_{2k+2}} E_j h_j \right), \quad (4.9)$$

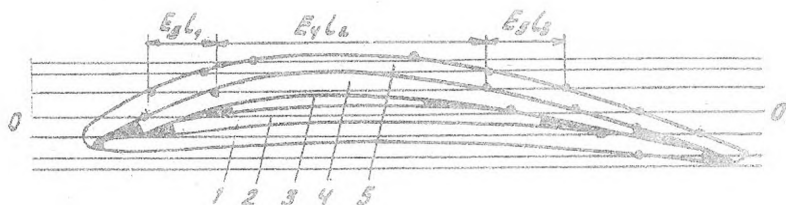
где $e = \delta / 2N$; n_i - число слоев в i -м сечении профиля.

Учитывая неоднородность материала и используя формулу Симпсона, легко получить выражения и для других физико-геометрических параметров сечения.

3. Определить параметры сечения можно и с помощью специальных сеток [37]. Принцип их построения состоит в том, что расстояния между параллельными линиями на сетке выбираются из условия равенства статических моментов (моментов инерции) площадок единичной ширины параметру сетки K .

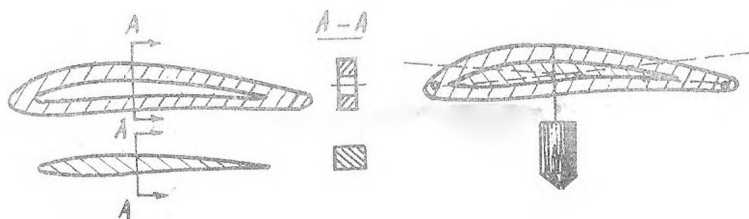
Для лопаток из КМ момент (инерции или статический) равен произведению параметра сетки на сумму произведений длин отрезков, отсекаемых контурной линией слоя и расположенных внутри слоя, на модуль упругости соответствующего слоя, в отличие от механических лопаток, для которых параметр сетки умножается на сумму длин отрезков, отсекаемых контурными линиями профиля сечения (рис. 4.2).

Если профиль вычерчен в масштабе $m:1$, то момент инерции, например, равен $I = K m^{-4} \sum E_i \ell_i$.



Р и с. 4.2. Определение физико-геометрических параметров сечения с помощью сеток

4. Физическую площадь сечения, вычерченного на миллиметровой бумаге, можно определить планиметрированием, суммируя произведения площади слоя на его модуль Юнга. Положение центра тяжести профиля определяется методом подвешивания. При этом макет профиля лопаток из трехкомпонентного (гибридного) КМ изготавливается склеиванием двух его частей, вырезанных из картона различной толщины $H_{1(2)}$. Соотношение толщин выбирается из условия $H_2 H_1^{-1} = \rho_2 \rho_1^{-1}$, где $\rho_{1(2)}$ - плотность материала, армированного первым (вторым) типом наполнителя. Перед склеиванием из первой (второй) части заготовки вырезают слои, армированные вторым (первым) наполнителем (рис. 4.3). Для лопаток с равномерным распределением компонентов наполнителя, а также лопаток из двухкомпонентного КМ (матрица + наполнитель) положение центра тяжести приблизительно можно определить по формуле $m_{цт} = 0,43 \delta_c$; $\rho_{цт} = 0,76 \rho_c$, где ρ_c - максимальный подъем средней линии [37].



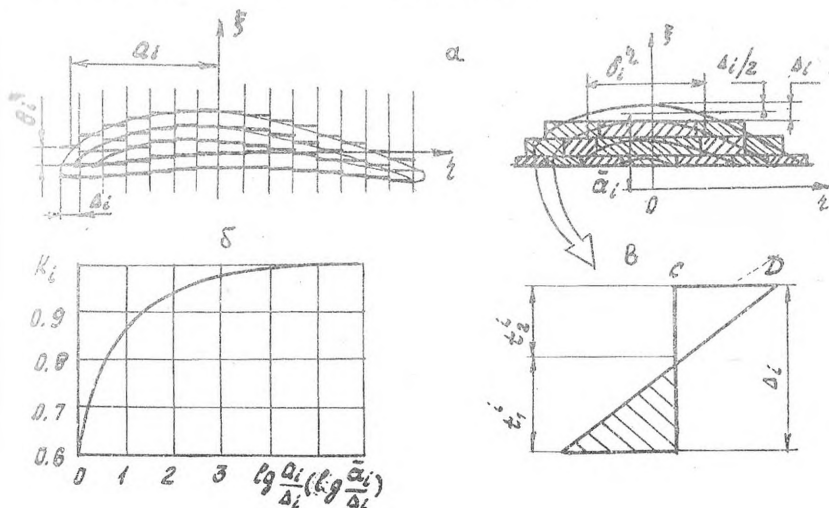
Р и с. 4.3. Определение центра тяжести неоднородного сечения

В целях упрощения расчетов угол поворота α главных приведенных осей относительно осей x_1, y_1 можно принять равным конструктивному углу установки профиля в расчетном сечении γ . Тогда ось ζ проходит через центр тяжести профиля параллельно хорде. Заменяя

криволинейные слои на прямолинейные, момент инерции сечения приближенно можно определить по формуле (рис. 4.4, а)

$$J_{\xi} = \sum_i E_i \sigma_i^4 \Delta_i (a_i^2 + \frac{\Delta_i^2}{12}); J_{\eta} = \sum_i E_i \sigma_i^2 \Delta_i (\bar{a}_i^2 + \frac{\Delta_i^2}{12}). \quad (4.10)$$

При описании профиля ступенчатой функцией соотношение $K_i = t_2^i / t_1^i$, определяющее $\sigma_i^{\xi}(\sigma_i^{\eta})$, устанавливается из условия равенства моментов инерции треугольников AOB и ODC (рис. 4.4, в) относительно осей $\xi(\eta)$. Его значение в зависимости от месторасположения слоя представлено на рис. 4.4, б.

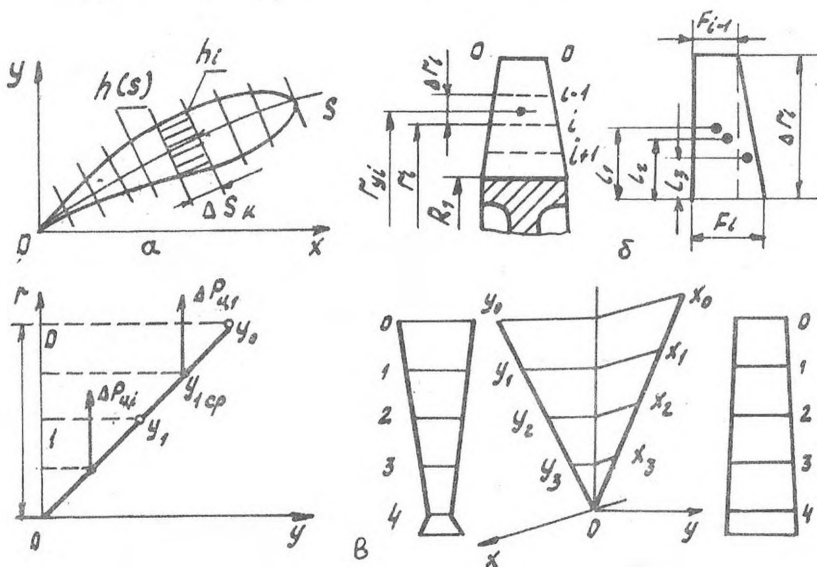


Р и с. 4.4. Аппроксимация криволинейных слоев (а, в) и зависимость коэффициента K_i от месторасположения слоя (б)

Используя эффективные упругие свойства и учитывая формулы (4.6), (4.7) и (4.10), физико-геометрические параметры сечения можно представить в виде

$$\begin{aligned} J_{\eta} &= \langle E_{\eta} \rangle \delta \sum_{i=1}^3 \bar{\lambda}_i^2 \bar{t}_i^2; \quad J_{\xi} = \langle E_{\xi} \rangle \delta L_1 [\bar{\lambda} a(a-\delta) + \bar{\lambda}_0 \delta^2]; \\ J_{\rho\eta} &= \langle E_{\rho\eta} \rangle \delta \left\{ \sum_{i=1}^4 \bar{\lambda}_i \bar{t}_i + \sum_{i=1}^2 [a(a-\delta) q_i \bar{r}_i + \delta^2 q_i \bar{r}_i] \right\}; \\ J_{\rho\xi} &= \langle E_{\rho\xi} \rangle \delta \left[\sum_{i=1}^7 Q_i (i+1)^{-1} + \sum_{i=2}^6 \Phi_i i^{-1} \right]; \quad \bar{T} = \langle G \rangle \delta (L_3/3 + L_1 L_K^{-1} c)/140; \\ J_{\rho\rho} &= \langle E_{\rho\rho} \rangle \delta \left\{ \sum_{i=1}^5 \bar{\lambda}_i^{\rho} \bar{t}_i^{\rho} + \sum_{i=1}^3 [a(a-\delta) q_{\rho,i} \bar{r}_{\rho,i} + \delta^2 q_{\rho,i} \bar{r}_{\rho,i}] + L_1 \sum_{i=0}^4 a^i \delta^{4-i} \bar{\lambda}_i \right\}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Здесь $\langle E_{p\gamma} \rangle = \langle E_{p\eta} \rangle = \langle E_p \rangle = (J_\gamma + J_\eta)(I_\gamma + I_\eta) \langle G \rangle$ — эффективный модуль сдвига, определяемый на основе формулы Гриффитса-Прескотта [36], равен $\langle G \rangle = \left(\sum_{K=1}^m C_K \Delta S_K \right)^{-1} \sum_{K=1}^m \left(\sum_{i=1}^{n_K} G_i h_i \right)^{1/3} \Delta S_K$ (рис. 4.5, а);



Р и с. 4.5. К определению $\langle G \rangle$ (а) и изгибающих моментов от центральных сил (б, в)

$$\begin{aligned}
 t_1^2 &= 3d^2 L_1; & r_2 &= 1,667 \cdot 10^{-2}; & \bar{r}_2 &= 4,762 \cdot 10^{-5}; & \varphi_7 &= a^2 L_1 (a + 3\delta); \\
 t_2^2 &= -3d L_2; & \bar{r}_1 &= -4d^3 L_1; & Q_1 &= -ad^2 L_1; & \varphi_4 &= -3ab L_1 (\delta + a); \\
 t_3^2 &= L_3; & \bar{r}_2 &= 6d^2 L_2; & Q_2 &= d^2 L_1 (a + \delta) + ad L_2; & \varphi_5 &= b^2 L_1 (\delta + 3a); \\
 \bar{\lambda}_1^2 &= 5,556 \cdot 10^{-2}; & \bar{r}_3 &= -4d L_3; & Q_3 &= d L_3 (\delta - 2a) + & \varphi_6 &= -b^3 L_1; \\
 \bar{\lambda}_2^2 &= 1,111 \cdot 10^{-2}; & \bar{r}_4 &= L_4; & Q_4 &= d L_2 (a + 2\delta) + & t_1^p &= 5d^4 L_1; \\
 \bar{\lambda}_3^2 &= 2,381 \cdot 10^{-3}; & \bar{\lambda}_1 &= 4,167 \cdot 10^{-2}; & Q_5 &= -L_3 (a + \delta) - 8d L_2; & t_2^p &= -10d^3 L_2; \\
 \bar{\lambda} &= 1,667 \cdot 10^{-1}; & \bar{\lambda}_2 &= 8,333 \cdot 10^{-3}; & Q_6 &= L_3 (a/3 + \delta); & t_3^p &= 10d^2 L_3; \\
 \bar{\lambda}_0 &= 5 \cdot 10^{-2}; & \bar{\lambda}_3 &= 1,786 \cdot 10^{-3}; & Q_7 &= -b L_3 / 3; & t_4^p &= -5d L_4; \\
 L_i &= L_0^i - L_K^i; & \bar{\lambda}_4 &= 3,969 \cdot 10^{-4}; & Q_8 &= -L_3 (a + \delta) - 8d L_2; & t_5^p &= L_5; & q_{p3} &= L_3; \\
 L_{C(K)} &= 4h_{C(K)}; & q_1 &= -2d L_1; & Q_9 &= -b^3 L_1 / 3; & \bar{\lambda}_1^p &= 3,333 \cdot 10^{-2}; \\
 r_1 &= 8,333 \cdot 10^{-2}; & \bar{r}_1 &= 2,5 \cdot 10^{-2}; & \varphi_2 &= -a^3 L_1; & \bar{\lambda}_2^p &= 6,667 \cdot 10^{-3};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_3^p &= 1,4 \cdot 10^{-3}; & q_{p,2} &= -dL_2; & \bar{r}_{p,1} &= 0,1; & \lambda_1 &= -0,133; \\ \lambda_4^p &= 3,175 \cdot 10^{-4}; & \bar{r}_{p,1} &= 3,33 \cdot 10^{-1}; & \bar{r}_{p,2} &= 1,9 \cdot 10^{-2}; & \lambda_2 &= 0,3; \\ \lambda_5^p &= 3,6 \cdot 10^{-4}; & \bar{r}_{p,2} &= 6,67 \cdot 10^{-2}; & \bar{r}_{p,3} &= 1,32 \cdot 10^{-3}; & \lambda_3 &= -0,33; \\ q_{p,1} &= d^2 L_4; & \bar{r}_{p,3} &= 4,76 \cdot 10^{-3}; & \lambda_0 &= 2,38 \cdot 10^{-2}; & \lambda_4 &= 0,167. \end{aligned}$$

Определение силовых факторов. Силовые факторы, действующие в отношении на радиусе r_L , вычисляются следующим образом (см. рис.

$$\begin{aligned} 4.1, B): & \quad p_L = \omega^2 \int_{r_L}^{R_2} \int_F \rho(x, y, r) r dF dr; \quad M_{kp, L}^u = \left| \omega^2 \int_{r_L}^{R_2} \int_F \rho(x, y, r) x, y dF dr \right|; \\ M_{x_i}^i &= M_{x_i}^i \cos \alpha_i + M_{y_i}^i \sin \alpha_i; \quad M_{x_i}^i = M_{rx}^i - M_{yx}^i; \\ M_{y_i}^i &= M_{x_i}^i \sin \alpha_i + M_{y_i}^i \cos \alpha_i; \quad M_{y_i}^i = M_{ry}^i - M_{yy}^i, \end{aligned}$$

где $M_{rx}, M_{ry}, M_{yx}, M_{yy}$ — изгибающие моменты относительно осей x и y от действия газовых и центробежных сил соответственно.

Центробежную силу p_L можно найти приближенно путем замены интеграла суммой конечных разностей

$$p_L = \omega^2 \sum_{j=1}^N \langle \rho_j \rangle \Delta V_j r_{Lj} = \sum_{j=1}^N \Delta p_j, \quad (4.13)$$

где $\langle \rho_j \rangle = \left(\sum_{K=1}^{n_j} \rho_K f_K + \sum_{K=1}^{n_{j-1}} \rho_K f_K \right) (F_j + F_{j-1})^{-1}$ — эффективная плотность материала j -го участка лопатки, $\Delta V_j = 0,5(F_j + F_{j-1})\Delta r_j$ — объем j -го участка лопатки, $\Delta r_{Lj} = r_j + \Delta r_{Lj}$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести рассматриваемого участка; ρ_K, f_K — плотность и площадь K -го слоя соответственно; n_j — количество слоев в j -м сечении; $F_j = \sum_{K=1}^{n_j} f_K$ — площадь j -го сечения; Δr_j — расстояние между сечениями j и $j-1$; r_j — расстояние от оси вращения до j -го сечения; $\Delta r_{Lj} = \Delta r_j \frac{2F_{j-1} + F_j}{3(F_j + F_{j-1})}$ — расстояние от j -го сечения до центра тяжести j -го участка (рис. 4.5, 6).

В соответствии с принятой гипотезой относительно режима обтекания величины моментов от газовых сил равны

$$\begin{aligned} M_{rx} &= \frac{G}{2\ell z} (C_{1u} - C_{2u})(R_2 - r_L)^2; \\ M_{ry} &= \left[\frac{G}{2\ell z} (C_{1a} - C_{2a}) + \frac{\pi r_0^2}{z} (p_1 - p_2) \right] (R_2 - r_L)^2. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Если центры тяжести сечений лопатки не лежат на радиусе, проходящем

через центр тяжести корневого сечения, то от действия центробежных сил возникает изгибающий момент. Поэтому при проектировании рабочих лопаток ГТД центры тяжести их сечений смещают с целью компенсации изгибных напряжений от газовых сил. Линию выноса центров тяжести сечения строят по координатам центров тяжести корневого сечения и пера всей лопатки. Корневое (K) сечение размещают в начале системы координат. Координата сечения P_{yT} , в котором расположен центр тяжести пера лопатки,

$$P_{yT} = P_K (\omega)^2 \sum_{i=1}^K \rho_i \Delta V_i)^{-1}. \quad (4.15)$$

Величины выносов x_{yT} и y_{yT} в сечении, проходящем через центр тяжести пера лопатки, находят, задавшись коэффициентом разгрузки $\lambda = 0,4 \dots 0,7$ в корневом сечении.

Если известны изгибающие моменты от газовых сил в корневом сечении $M_{rx,K}$ и $M_{ry,K}$, то можно записать

$$y_{yT} = \lambda_x \frac{M_{rx,K}}{\rho_K}; \quad x_{yT} = \lambda_y \frac{M_{ry,K}}{\rho_K} \quad (4.16)$$

Построив линию выносов центров тяжести сечений по осям x и y , определяют выносы центров тяжести для каждого расчетного сечения (рис. 4.5, в). Тогда изгибающие моменты от центробежных сил в i -м сечении, будут

$$M_{yy}^i = \sum_{j=1}^i \Delta P_{yj} (x_{jcp} - x_i); \quad M_{yx}^i = \sum_{j=1}^i \Delta P_{yj} (y_{jcp} - y_i), \quad (4.17)$$

где $x_{jcp} = 0,5(x_j + x_{j-1})$; $y_{jcp} = 0,5(y_j + y_{j-1})$.

Определение запаса прочности лопатки и разработка мероприятий по обеспечению ее работоспособности. Деформации растяжения от центробежных сил ε_0 постоянны по сечению, а деформации изгиба $\varepsilon_{u,\xi}$ и $\varepsilon_{u,\eta}$ (4.5) линейно зависят от координат η и ξ соответственно. На границах i и $i+1$ слоев в m -м сечении профиля

$$\varepsilon_{u,i}^m = \varepsilon_{u,0}^m \xi_i^m / \xi_K^m,$$

где $\xi_i^m = \xi_K^m - \sum_{j=i+1}^S h_j$ при $S \leq i \leq n_m - 1$; $\xi_i^m = \xi_K^m - \sum_{j=1}^i h_j$ при $1 \leq i < S$;

S - номер слоя, в котором расположена срединная линия профиля;

ξ_K^m - координата спинки (корытца) в m -м сечении; h_j - толщина j -го слоя.

Такое распределение деформаций соответствует принятым кинематическим гипотезам. Напряжения σ в силу разрывности модуля упругости E претерпевают разрыв на границах слоев. Так как прочность слоев может быть различной (из-за различий, например, наполнителя и структуры армирования), то требуется послойная оценка запаса прочности. Анализ формул (4.2)-(4.5), (4.13), (4.14) позволил установить следующее. Наиболее напряженным является корневое сечение. Максимальные напряжения изгиба возникают в наиболее удаленных от главных осей ξ, η точках профиля A, B, C (см. рис. 4.1, в). Раскрутка пера приводит к появлению сжимающих напряжений, максимальных в точках, наиболее удаленных от оси лопатки ξ , т.е. на ее кромках. Для сильно закрученных лопаток из существенно анизотропных КМ, когда велико значение E/σ , они могут превалировать над другими напряжениями [3]. В этом случае наблюдается существенная неоднородность НДС по сечению. Причем максимальные растягивающие напряжения возникают в середине корытца (точка D на рис. 4.1, в). На кромках действуют и максимальные напряжения мексложного $\tau_{\xi\eta}$ и тангенциального $\tau_{\xi\eta}$ сдвигов.

Таким образом, необходимо послойно оценивать запас прочности в сечениях с точками A, B, C и D по нормальным и касательным напряжениям.

Запас прочности в каждом j -м слое i -го сечения профиля данного расчетного сечения лопатки определяется на основе критерия максимальных напряжений:

$$K_{ij} = \sigma_{\sigma} \sigma_{ij}^{-1}; \quad K^0 = \tau_{\xi\eta} \tau_{\xi\eta}^{-1}; \quad K^* = \tau_{\xi\eta} \tau_{\xi\eta}^{-1}. \quad (4.19)$$

Здесь в качестве предельно допустимых напряжений для материала лопаток компрессоров принимаются пределы прочности при растяжении (сжатии) σ_{σ}^+ (σ_{σ}^-), тангенциальном $\tau_{\xi\eta}$ и поперечном $\tau_{\xi\eta}$ сдвигах или соответствующие пределы ползучести σ_{a2}^+ (σ_{a2}^-), $\tau_{a2}^{\xi\eta}$, $\tau_{a2}^{\eta\xi}$. Для лопаток турбин следует принимать предел длительной прочности σ_{σ}^t и $\tau_{\xi\eta}^t$. В соответствии с критерием максимальных напряжений (см. главу I) в зависимости от угла армирования слоя φ возможны три типа разрушений от нормальных напряжений, соответствующих пределам прочности (I.9)

$$\sigma_{\sigma} = \sigma_0 \cos^2 \varphi; \quad \sigma_{\xi} = \tau_0 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi; \quad \sigma_{\eta} = \sigma_{90} \sin^2 \varphi.$$

Оценку прочности при многокомпонентном НДС ($\sigma, \tau_{\xi\eta}, \tau_{\xi\eta}$) можно выпол-

нить на основе различных феноменологических критериев прочности (см. главу I).

Если $K_{ij} < \bar{K}_{ij}$ ($K < \bar{K}^0$; $K^* < \bar{K}^*$), где $\bar{K}$ - допустимое значение коэффициента запаса прочности, то необходимо разработать мероприятия по повышению прочности лопаток. В качестве допустимых следует принимать $\bar{K}_{ij} = 1,5 \dots 2,0$; $\bar{K}^0 = \bar{K}^* = 2,5 \dots 3,0$.

Повышение прочности лопаток из КМ можно достигнуть не только изменением геометрических параметров (например, распределением площади сечения по высоте), но и структуры материала путем замены наполнителя или угла его армирования. При этом необходимо учитывать следующие общие рекомендации.

1. С целью обеспечения работоспособности лопаток при изгибе и кручении наружные слои должны обладать высокими упругими и прочностными свойствами. Структура их армирования зависит от удлинения лопатки (см. главу 5).

2. Внутренние слои, воспринимающие в основном центробежную силу, должны быть армированы под углом 0° .

3. При увеличении числа перекрестно-армированных существенно анизотропных слоев касательные напряжения, возникающие между продольными слоями, возрастают /35/.

4.2. Определение прочности бороалюминиевой лопатки вентилятора

В качестве примера исследуем прочность бороалюминиевой лопатки вентилятора. Исходными являются следующие данные.

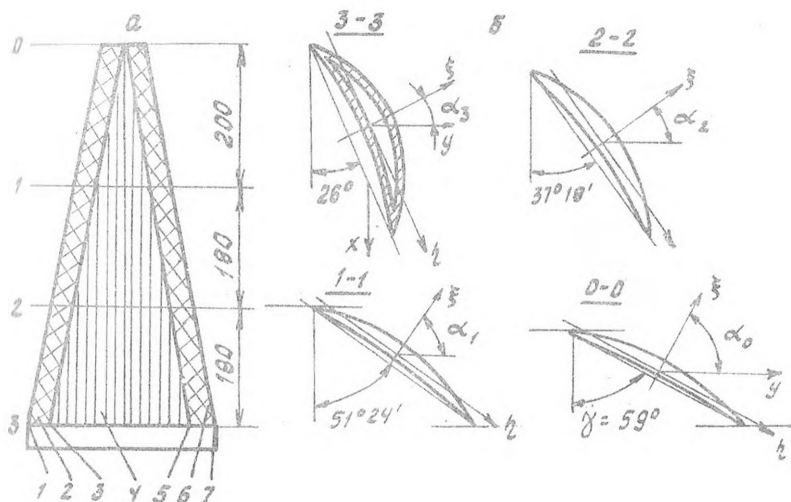
Тип и свойства материала (компонентов) - бороалюминий В-АЛ, $E_H = 42 \cdot 10^4$ МПа; $\mu_H = 0,15$; $E_0 = 7,25 \cdot 10^4$ МПа; $\mu_0 = 0,33$; $\omega = 0,2$; $V_H = 0,48$; $\sigma_0 = 1000$ МПа; $\tau_0^{42} = 85$ МПа; $\tau_0^{52} = 210$ МПа; $\rho = \langle \rho \rangle = 2,65 \cdot 10^3$ кг/м³; $h_i = 10^{-4}$ м.

Структура армирования лопатки по корневому сечению $(0_2/\pm 30_\alpha/\pm 15/0_\beta/\pm 15/\pm 30_\alpha/0_2)_T$. Внутренние слои, армированные под углом 0° , составляют 70% от максимальной толщины профиля.

Параметры потока $C_{1u} = 210$ м/с; $C_{2u} = 21,3$ мс⁻¹; $C_{1a} = 215$ мс⁻¹; $C_{2a} = 210$ мс⁻¹; $p_1 = 101$ кПа; $p_2 = 168$ кПа; $G = 461,54$ кгс⁻¹ с; $t = 20^\circ\text{C}$.

Параметры рабочего колеса $\omega = 517,5$ с⁻¹; $\ell = 0,56$ м; $R_2 =$

1,054 м; $P'_0 = 0,774$ м; $Z = 32$. Заданы профили в четырех сечениях лопатки и углы их установки γ (рис. 4.6).



Р и с. 4.6. Структура материала лопатки из бореалюминия (а) и профиля сечения (б)

При максимальной толщине профиля в расчетных сечениях $C_{0,1,2,3}^{max} = (5,9, 12, 15) \cdot 10^{-3}$ м заданная структура армирования эквивалентна семислойной ($n = 7$) структуре с углом армирования (толщиной $h_{c,j}$) слоев $\varphi_{1,7} = 0^\circ$ ($h_{1,7} = 0,2 \cdot 10^{-3}$); $\varphi_{2,6} = \pm 30^\circ$ ($h_{2,6} = 1,8 \cdot 10^{-3}$); $\varphi_{3,5} = \pm 15^\circ$ ($h_{3,5} = 0,2 \cdot 10^{-3}$); $\varphi_4 = 0^\circ$ ($h_4 = 0,6 \cdot 10 - 10,6 \cdot 10^{-3}$).

Результаты исследования упругих и прочностных свойств слоя В-АЛ и эффективных свойств пера лопатки представлены в таблицах 4.1 и 4.2 и на рис. 4.7.

На первом этапе при определении нормальных напряжений σ принято $\theta = d\varphi/dr = M_{кр}^4$. Результаты расчета представлены в табл. 4.3-4.5 и на рис. 4.8, 4.9.

Пологая $M_{кр}^4 = 0$, рассмотрим для наиболее напряженного корневого сечения влияние упругой раскрутки пера на прочность лопатки (см. табл. 4.6).

Т а б л и ц а 4.1

Упругие и прочностные свойства слоя В-Ас

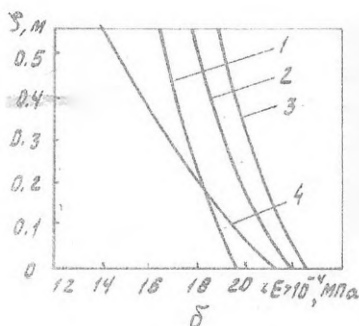
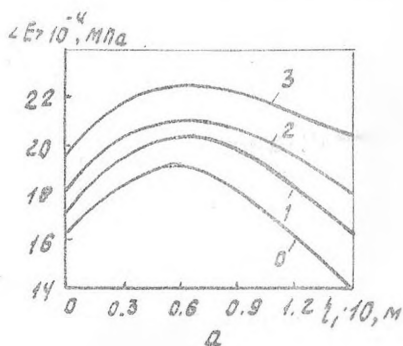
Метод определения (формула, рисунок)	Угол армиро- вания φ , град	Упругие свойства $E, \sigma \cdot 10^{-4}$, МПа				Прочность $\sigma, \tau \cdot 10^{-1}$, МПа*		
		$E_1 = E_2^y$	E_2	G_{12}	μ_{12}	σ_σ	σ_σ^{25}	σ_σ^{45}
(I.5) рис. I.2	0	24	14,5	6,2	0,23	100	21,0	8,5
$\tau_{\sigma, 46} = 333$ МПа/Г7/	± 15	22	14,5	6,6	0,25	84	23,1	8,5
$\sigma_{90} = 301$ МПа	± 30	19	15,0	7,5	0,28	48,5	29,0	8,5

* Принято, что прочность КМ при армировании под углами φ и $\pm \varphi$ одинакова.

Т а б л и ц а 4.2.

Распределение эффективного модуля упругости $\langle E \rangle$ по перу
лопатки

Номер расчетной формулы	Номер сечения лопатки i и профиля j								
	$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	
(4.6')	0	16,4	17,7	18,7	19,1	17,4	15,8	14,1	
	1	17,2	19,0	19,9	20,2	19,3	18,0	16,2	
$\langle E \rangle \cdot 10^{-4}$, МПа	2	18,4	20,0	20,7	21,0	20,4	19,3	18,1	
	3	19,4	21,5	22,2	22,3	21,8	21,4	20,6	



Р и с. 4.7. Распределение $\langle E \rangle$ по хорде (а) и высоте лопатки (б): а — 0,1,2,3 — номер сечения; б — $2_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м (1), 0,024 (2), 0,048 (3); 0,152 (4)

Т а б л и ц а 4.3

Расчет прочности лопаток из В-Ас в точках А, В, С

Характеристика	Место определения характеристики (номер формул, рисунков, таблиц)	Размерность	Номер сечения $\bar{i}$ и участка лопатки J			
			0	I	2	3
<u>Определение напряжений от центробежных сил</u>						
F_i	планиметрирование	$10^4, \text{м}^2$	4,88	11,62	13,36	17,53
F_i	планиметрирование	Мн	90,77	221,94	267,2	387,41
$\langle E_i \rangle$	(4.6)	$10^{-4}, \text{МПа}$	18,6	19,1	20,0	22,1
Δr_j	чертеж лопатки	м	—	0,20	0,18	0,18
r_{4j}	(4.13)	м	—	0,94	0,76	0,58
Δp_j	(4.13)	$10^{-3}, \text{Н}$	—	113	121	115
p_i	(4.13)	$10^{-3}, \text{Н}$	—	113	234	349
$\epsilon_{0,i}$	(4.5)	10^3	—	0,51	0,87	0,9
ϵ_{pi}^0	—	—	—	122	209	216
ϵ_{pi}^{10}	(4.5), табл. 4.1	МПа	—	112	191	198
ϵ_{pi}^{30}	—	—	—	97	165	171
$\epsilon_{pi}^y = E_i^y \epsilon_{0,i}$	—	—	—	—	—	—
<u>Определение напряжений изгиба</u>						
r_j	рис. 4.6	М	1,054	0,854	0,674	0,494
M_{rx}^i	(4.14)	Н·м	0	-97,2	-350,9	-762,0
M_{ry}^i	—	Н·м	0	-201	-725,5	-1575,5
r_{4T}	(4.12)	М	—	0,736	—	—
x_{4T}	(4.16) $\lambda_y = 0,5$	$10^3, \text{м}$	—	-2,26	—	—
y_{4T}	$\lambda_x = 0,5$	$10^3, \text{м}$	—	-1,09	—	—
x_i	рис. 4	$10^3, \text{м}$	-5,3	-3,4	-1,7	0
M_{xy}^i	(4.17)	Н·м	—	-107,35	-402,3	-897,85
y_i	рис. 4	$10^3, \text{м}$	-2,56	-1,64	-0,82	0
M_{yx}^i	(4.17)	Н·м	—	-52	-194,25	-433,28
M_{xx}^i	—	Н·м	—	-93,65	-323,2	-677,65
M_{yy}^i	(4.12)	Н·м	—	-45,2	-156,65	-328,72
$\alpha_i = \beta_i$	Рис. 4.6, б	град	59	51,4	37,3	26
m_{4T}	подвешивание макета	$10^3, \text{м}$	72	72	72	72
m_{4T}	профиля	—	1,5	5,3	12	16
M_{xz}^i	(4.14)	Н·м	—	-101,4	-320,4	-592,3
M_{yz}^i	—	Н·м	—	-23,1	-162,0	-465,2
J_z^i	(4.10)	$10^{-4}, \text{Нм}^2$	0,017	0,14	0,62	1,4
J_z^i	—	$10^{-4}, \text{Нм}^2$	13,0	24,0	33,7	46,0

Характеристика	Место определения характеристики (номер формул, рисунок, таблиц)	Размерность	Номер сечения i и участка лопатки j			
			0	I	2	3
σ_A^I	рис. 4.6, б	$\text{Ю}^2, \text{м}$	-7,2	-7,2	-7,2	-7,2
σ_B^I		$\text{Ю}^2, \text{м}$	0,55	0,6	0,65	0,7
σ_C^I		$\text{Ю}^2, \text{м}$	8,4	8,4	8,4	8,4
σ_A^I	рис. 4.6, б	$\text{Ю}^2, \text{м}$	-0,2	-0,5	-1,2	-1,8
σ_B^I		$\text{Ю}^2, \text{м}$	0,3	0,5	I	I,2
σ_C^I		$\text{Ю}^2, \text{м}$	-0,25	-0,6	-1,2	-1,6
$\sigma_{II,2}^C$	(4.5)	$\text{Ю}^4, \text{м}$	-	3,6	6,24	7,56
$\sigma_{II,2}^B$		Ю^6	-	6,9	34,63	72,72
$\sigma_{II,2}^A$		Ю^4	-	-3,6	-5,2	-5,04
$\sigma_{II,2}^B$	$\sigma_{II,2}^K = \frac{M_{II}^I}{J_{II}^I} \cdot \xi_{II}^I$	Ю^6	-	-0,58	-3,13	-7,07
$\sigma_{II,2}^A$		Ю^4	-	4,32	6,24	6,72
$\sigma_{II,2}^B$		Ю^6	-	-8,064	-40,4	-84,84
$\sigma_{II,2}^A$	$\sigma_{II,2}^K = \frac{M_{II}^I}{J_{II}^I} \cdot \xi_{II}^I$	Ю^5	-	35,3	58,9	68,3
$\sigma_{II,2}^B$		Ю^5	-	-35,9	-51,9	-49,7
$\sigma_{II,2}^A$		Ю^5	-	44,1	66,4	75,7
$\sigma_{II,2}^B$	(4.5)	МПа	-	84,7	141,4	163,9
$\sigma_{II,2}^A$		МПа	-	-86,2	-124,6	-119,3
$\sigma_{II,2}^B$		МПа	-	105,8	159,4	181,7
<u>Определение суммарных напряжений</u>						
σ_A^B	(4.5)	МПа	-	206,7	350,4	379,9
σ_B^B		МПа	-	35,8	84,4	96,7
σ_C^B		МПа	-	227,8	368,4	397,7
<u>Определение запаса прочности</u>						
K^A	(4.19)	-	-	4,84	2,85	2,63
K^B		-	-	27,9	11,8	10,3
K^C		-	-	4,39	2,71	2,51
$\sigma_B = \sigma_0 = 1000 \text{ МПа}$						

Анализ результатов расчета позволил установить следующее. Эффективный модуль упругости возрастает к середине профиля корневого сечения лопатки. При отсутствии раскрутки пера наиболее нагруженными являются кромки лопатки. Минимальным коэффициентом запаса прочности обладает выходная кромка ($K^C = 2,51$). Причем допустимый запас прочности слоя с углом армирования 30° обеспечивается только при термо-

Т а б л и ц а 4.4

Послойная оценка прочности лопатки в сечении профиля с точкой В

Характеристика	Метод определения характеристики (номер формул, рисунков, таблиц)	Размерность	Номер сечения лопатки		
			1	2	3
$\sigma_{4,6}^B$	(4.18)	10 ⁵	-34,5	-50,9	-48,9
$\sigma_{4,5}^B$			-21,5	-41,5	-41,4
$\sigma_{4,4}^B$			-20,1	-40,5	-40,6
$\sigma_{4,6(0)}^B$			-82,8	-122,2	-117,4
$\sigma_{4,6(30)}^B$			-65,6	-96,7	-92,9
$\sigma_{4,5(30)}^B$	(4.5)	МПа	-40,9	-78,9	-78,7
$\sigma_{4,5(15)}^B$			-47,3	-91,3	-91,1
$\sigma_{4,4(15)}^B$			-44,2	-89,1	-89,3
$\sigma_{4,4(0)}^B$			-48,2	-97,2	-97,4
$\sigma_{6(0)}^B$			39,2	86,8	98,6
$\sigma_{6(30)}^B$	(4.5)	МПа	31,4	68,3	78,1
$\sigma_{5(30)}^B$			56,1	86,1	92,3
$\sigma_{5(15)}^B$			64,7	99,7	106,9
$\sigma_{4(15)}^B$			67,8	101,9	108,7
$\sigma_{4(0)}^B$			73,8	111,8	118,6
κ^B	табл. 4.3	-	27,9	11,8	10,3
$\kappa_{6(0)}^B$	(4.19) $\sigma_{\theta} = 1000$ МПа		25,5	11,5	10,1
$\kappa_{6(30)}^B$	(4.19) $\sigma_{\theta} = 485^*$		15,4	7,09	6,2
$\kappa_{5(30)}^B$	(4.19) $\sigma_{\theta} = 485$		8,62	5,63	5,24
$\kappa_{5(15)}^B$	(4.19) $\sigma_{\theta} = 840$		13	8,42	7,85
$\kappa_{4(15)}^B$	(4.19) $\sigma_{\theta} = 840$		12,37	8,25	7,73
$\kappa_{4(0)}^B$	(4.19) $\sigma_{\theta} = 1000$		13,5	8,94	8,43

* Прочность термообработанного материала

обработке бoroалюминия (см. табл. 4.5). В среднем сечении профиля (сечение с точкой В, табл. 4.4) наименьший запас прочности наблюдается у слоя с $\varphi = 30$ на границе пятого и шестого слоев. Раскрутка лопатки приводит к снижению напряжений на кромках и к повышению их в средней части пера. Однако в силу малого значения $\langle \sigma \rangle / \langle \sigma \rangle' \approx 3,4$ проявляется умеренная по сечению неоднородность НДС. При раскрутке пера возникает опасность разрушения кромок от тангенциального сдви-

Т а б л и ц а 4.5

Расчет прочности выходной кромки в корне лопатки
в сечении профиля с точкой С

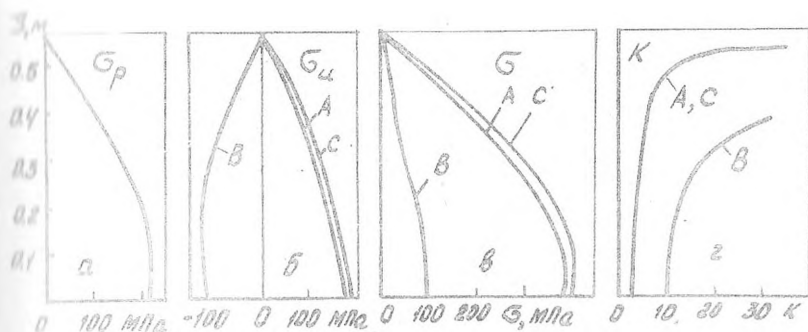
Параметр	Метод определения	Размерность	Сечение № 3	Параметр	Метод определения	Размерность	Сечение № 3
$\sigma_{\perp}^c$	рис. 4.6	$Ю^{-2}$	-1,58	$\sigma_{\perp(10)}^c$	(4.5)	МПа	142,3
$\sigma_{\perp(1)}^c$	табл. 4.3	$Ю^6$	-84,84	$\sigma_{\perp(10)}^c$	(4.5)	МПа	395,7
$\sigma_{\perp(2)}^c$	(4.18)	$Ю^4$	6,64	$\sigma_{\perp(30)}^c$	(4.5)	МПа	313,3
$\sigma_{\perp(1)}^c$	(4.5)	$Ю^5$	74,9	$K_{\perp(10)}^c$	(4.19)		2,53
$\sigma_{\perp(10)}^c$	(4.5)	МПа	179,7	$K_{\perp(30)}^c$	(4.19)		1,55

Т а б л и ц а 4.6

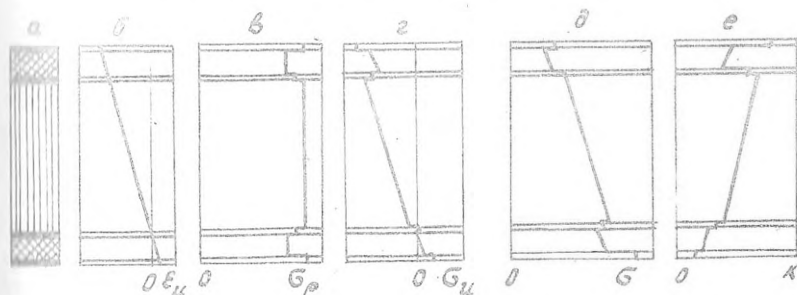
Параметр	Метод определения	Расчетная точка		Параметр	Метод определения	Расчетная точка	
		С	Д			С	Д
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$	(4.11)	5,127		$\sigma_{\perp(30)}^c$, МПа	(4.3)	267	212,9
$\sigma_{\perp(1)} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$		-2,254		$\tau_{\perp}^{25}$, МПа		170,6	21,3
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$		4,74		$\tau_{\perp(10)}^{25}$, МПа		168	19,2
$\sigma_{\perp(1)} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$		2,058		$\tau_{\perp(30)}^{25}$, МПа		203	23,2
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$		5,215		$\tau_{\perp}^{25}$, МПа		30,3	2,05
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$	рис. 4.6	1,034		$\tau_{\perp(10)}^{25}$, МПа		29,6	2,01
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$	(4.3)	8,597		$\tau_{\perp(30)}^{25}$, МПа		23,5	1,59
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$	(4.3)	6,966		K	(4.19)	2,92	3,68
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ Н/мм}^2$		1,01		$K_{\perp(10)}$		2,96	3,72
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ МПа}$	рис. 4.6	-16	-2	$K_{\perp(30)}$		1,82	2,28
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ МПа}$		84	7	K^c		1,23	9,86
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ МПа}$		-15,8	-1,8	$K_{\perp(10)}^c$		1,25	10,9
$\sigma_{\perp} 10^{-3} \text{ МПа}$		84	7	$K_{\perp(30)}^c$		1,43	12,5
σ , МПа	(4.3)	342,9	271,7 *	K^*		2,8	41,5
$\sigma_{\perp(10)}$, МПа		337,4	269	$K_{\perp(10)}^*$		2,87	42,3
				$K_{\perp(30)}^*$		3,62	53,5

* σ^D (без учета раскрутки) = 237,9 МПа

га. Анализ формул (4.3) и (4.4) показал, что уменьшить эти напряжения возможно путем увеличения степени анизотропии $\langle E \rangle < G \rangle$,



Р и с. 4.8. Распределение напряжений от центробежных сил (а), изгибных (б) и суммарных (в) напряжений и коэффициента прочности (г) по высоте лопатки



Р и с. 4.9. Структура материала (а) и эпюры деформации изгиба (б), напряжений от центробежных сил (в), изгибных (г) и суммарных (д) напряжений, коэффициента запаса (е) в сечении профиля с точкой В корневого сечения лопатки

которое достигается при уменьшении угла армирования. Таким образом, при данной геометрии лопатки с точки зрения уменьшения напряжений тангенциального сдвига целесообразно заменить у всех (или части) слоев угол армирования $\varphi = \pm 30^\circ$ на $\varphi = 0^\circ$. Возможно также наружные слои армировать под углом $\pm 45^\circ$. Это может несколько уменьшить $\langle E \rangle \langle G \rangle^{-1}$, но повысит в 1,58 раза прочность слоев при сдвиге. Даже при сохранившемся уровне напряжений σ^{25} (табл. 4.6) минимальный коэффициент запаса прочности K^0 возрастает до 1,95. Конструктивные изменения лопатки требуют перо-профилирования ее пера и доработки технологической оснастки.

5. ВИБРОПРОЧНОСТЬ И РАЦИОНАЛЬНОЕ АРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Работоспособность и надежность конструкций, подверженных при эксплуатации вибрационным нагрузкам, во многом зависят от вибропрочности и живучести элементов конструкций. Последнее характеризуется энергией разрушения и временем распространения трещины. Вибропрочность конструкции – прочность при (и после) заданной вибрации определяется уровнем выносливости и демпфирующих свойств. Чем больше выносливость конструкции, тем более высокие вибрационные напряжения она может выдерживать. Чем выше рассеяние энергии, тем меньше уровень действующих напряжений.

Выносливость конструкции может быть ниже выносливости материала, установленной на образцах. Это связано с наличием концентраторов напряжений, например, в узлах крепления и технологических дефектов, обусловленных отклонением параметров технологии, особенно при изготовлении крупногабаритных геометрически и структурно сложных деталей. Рассеяние энергии в конструкции ГТД идет по трем основным направлениям: в материале (внутреннее трение), в воздушном (газовом) потоке от взаимодействия с ним элементов конструкции (аэродинамическое демпфирование) и в подвижных деталях за счет сил трения (конструкционное демпфирование). Если к этому добавить, что при некоторых режимах эксплуатации возможно появление опасных резонансных явлений, то становится понятным, почему вопросы обеспечения вибропрочности элементов из КМ, и в частности лопаток ГТД, решаются на всех этапах их создания.

5.1. Теория рассеяния энергии в композиционных материалах и конструкциях

Композиционные материалы и в отношении диссипативных свойств являются анизотропными. Поэтому демпфирующие характеристики КМ при одноосном растяжении /38,39,40/, плоском и объемном НДС /II,40,4I,45/ описываются через "технические" постоянные рассеяния как тензор 4-го ранга. При определении технических постоянных используются два основных подхода: феноменологический и структурный. В первом случае /II,38-4I,45/ они определяются экспериментально на образцах при простых видах НДС, во втором – на основе простейших структурных тео-

рий типа теории смесей /41,42/. Описанию диссипативных свойств конструкций из КМ посвящен ряд работ /41-44 и др./. Обычно при определении энергии рассеяния считают, что диссипативные свойства системы не влияют на ее собственные частоты и формы колебаний, т.е. система удовлетворяет правилу Видлера. При определении спектра свободных колебаний используются простые физические и кинематические модели и гипотезы (модели трехслойных балок или пластин, гипотеза Кирхгофа).

Демпфирующая способность композиционных материалов в общем случае зависит от структуры армирования, вида и уровня напряженно-деформированного состояния, температуры и частоты нагружения. При определении энергии рассеяния на границах однородных анизотропных линейно-упругих слоев выполняется условие жесткого контакта. За уровень рассеянной энергии принят коэффициент поглощения (диссипации) $\psi = \Delta W / W$, где ΔW - рассеянная за цикл нагружения удельная энергия; W - удельное амплитудное значение потенциальной энергии в цикле. Естественно, что $0 \leq \Delta W \leq W$, а $0 \leq \psi \leq 1$. Возможно также использование логарифмического декремента колебаний $\delta = \ln(a_i / a_{i+1})$, где a_i и a_{i+1} - две последующие амплитуды в начале и в конце i -го периода (цикла) колебаний. В случае малого затухания и при слабой зависимости рассеяния энергии от частоты колебаний $\psi = 2\delta$.

Рассеянная энергия определяется в предположении, что сила неупругого сопротивления, пропорциональная действующему напряжению, при циклическом деформировании совершает работу трения. В этом случае

$$\Delta W = \frac{1}{2} \{ \epsilon \}^T [\psi] \{ \sigma \}, \quad (5.1)$$

где $\{ \epsilon \} = \{ \epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \epsilon_{44}, \epsilon_{55}, \epsilon_{66} \}^T$ - матрица-столбец амплитуды деформаций; $\{ \sigma \} = \{ \sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{44}, \sigma_{55}, \sigma_{66} \}^T$ - матрица-столбец амплитуды напряжений; индекс "Т" означает операцию транспонирования; $[\psi]$ - диагональная матрица диссипации, компоненты которой представляют шесть независимых технических констант ψ_i , устанавливаемых экспериментально при простых видах НДС и определяющих диссипацию энергии при различных сложных НДС.

Закон Гука (I.I) для анизотропного материала в матричной форме можно представить в виде

$$\{ \sigma \} = [A] \{ \epsilon \} \quad \text{или} \quad \{ \epsilon \} = [a] \{ \sigma \}, \quad (5.2)$$

где $[A]$ ($[a]$) - матрица упругости (податливости) материала.

Учитывая формулу (5.2), рассеянную (5.1) и потенциальную энергии можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Delta W &= 0,5\{\sigma\}^T[\psi]^T\{\varepsilon\}; & W &= 0,5\{\sigma\}^T\{\varepsilon\}; \\ \Delta W &= 0,5\{\sigma\}^T[P]\{\sigma\}; & W &= 0,5\{\sigma\}^T[a]\{\sigma\}; \\ \Delta W &= 0,5\{\varepsilon\}^T[U]\{\varepsilon\}; & W &= 0,5\{\varepsilon\}^T[A]\{\varepsilon\}.\end{aligned}\quad (5.3)$$

Здесь податливодиссипативная $[P] = [\psi][a]$ и упругодиссипативная $[U] = [\psi][A]$ матрицы в силу диагональности матрицы $[\psi]$ ($[\psi] = [\psi]^T$) несимметричны и имеют вид

$$[P] = \begin{bmatrix} a_{11}\psi_1 & a_{12}\psi_1 & \dots & a_{16}\psi_1 \\ a_{12}\psi_2 & a_{22}\psi_2 & \dots & a_{26}\psi_2 \\ a_{13}\psi_3 & a_{23}\psi_3 & \dots & a_{36}\psi_3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{16}\psi_6 & a_{26}\psi_6 & \dots & a_{66}\psi_6 \end{bmatrix}; [U] = \begin{bmatrix} A_{11}\psi_1 & A_{12}\psi_1 & \dots & A_{16}\psi_1 \\ A_{12}\psi_2 & A_{22}\psi_2 & \dots & A_{26}\psi_2 \\ A_{13}\psi_3 & A_{23}\psi_3 & \dots & A_{36}\psi_3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{16}\psi_6 & A_{26}\psi_6 & \dots & A_{66}\psi_6 \end{bmatrix}. \quad (5.4)$$

Для приведения матриц $[P]$ и $[U]$ к симметричному виду можно принять $P_{ij} = a_{ij}\psi_{ij}$ и $U_{ij} = A_{ij}\psi_{ij}$, где P_{ij} и U_{ij} — элементы матриц $[P]$ и $[U]$ соответственно, а $\psi_{ij} = 0,5(\psi_i + \psi_j)$. В этом случае $\psi_{ij} = \psi_{ji}$, а $\psi_{ii} = \psi_i$ и энергия диссипации не изменится.

Отметим, что из формулы (5.3) следуют уравнения связи

$$[U] = [A][P][A]; [P] = [a][U][a]. \quad (5.5)$$

Установим структуру матриц $[P]$ и $[U]$ для материала с различным видом анизотропии.

Однонаправленный слой. Для слоя, армированного в направлении I (см. рис. I.I), плоскость 23 можно рассматривать как плоскость изотропии. В этом случае податливодиссипативная матрица с учетом (I.2), (5.4) имеет вид, представленный в табл. 5.I.

Отметим, что для однонаправленного слоя необходимо знать четыре технические постоянные диссипации $\psi_1, \psi_2, \psi_4, \psi_6$ и пять упругих постоянных $E_1, E_2, G_{12}, \mu_{12}, \mu_{23}$.

Таблица 5.1

i	j					
	1	2	3	4	5	6
	Коэффициенты P_{ij}			матрицы $[P] = [P_{ij}] = [\psi][a]$		
1	$E_1^{-1} \psi_1$	$-E_1^{-1} \mu_{12} \psi_{12}$	$-E_1^{-1} \mu_{12} \psi_{12}$	0	0	0
2	$-E_1^{-1} \mu_{12} \psi_{21}$	$E_2^{-1} \psi_2$	$-E_2^{-1} \mu_{23} \psi_2$	0	0	0
3	$-E_1^{-1} \mu_{12} \psi_{21}$	$-E_2^{-1} \mu_{23} \psi_2$	$E_2^{-1} \psi_2$	0	0	0
4	0	0	0	$2E_2^{-1}(1+\mu_{23})\psi_4$	0	0
5	0	0	0	0	$E_{12}^{-1} \psi_6$	0
6	0	0	0	0	0	$G_{12}^{-1} \psi_6$

Ортотропный слой. Для слоя, обладающего тремя плоскостями симметрии, коэффициенты матрицы $[P]$ даны в табл. 5.2. Видно, что они определяются шестью техническими постоянными диссипации ψ_i ($i = \overline{1,6}$) и девятью упругими постоянными E_μ ($\mu = \overline{1,3}$), G_{12} , μ_{12} , G_{13} , μ_{13} ($i = \overline{1,2}$).

Таблица 5.2

i	j					
	1	2	3	4	5	6
	Коэффициенты P_{ij}			матрицы $[P] = [P_{ij}] = [\psi][a]$		
1	$E_1^{-1} \psi_1$	$-E_1^{-1} \mu_{12} \psi_{12}$	$-E_1^{-1} \mu_{13} \psi_{13}$	0	0	0
2	$-E_2^{-1} \mu_{21} \psi_{21}$	$E_2^{-1} \psi_2$	$-E_2^{-1} \mu_{23} \psi_{23}$	0	0	0
3	$-E_3^{-1} \mu_{31} \psi_{31}$	$-E_3^{-1} \mu_{32} \psi_{32}$	$E_3^{-1} \psi_3$	0	0	0
4	0	0	0	$G_{23}^{-1} \psi_4$	0	0
5	0	0	0	0	$G_{13}^{-1} \psi_5$	0
6	0	0	0	0	0	$G_{12}^{-1} \psi_6$

5.1.1. Преобразование диссипативных матриц при повороте системы координат

Элементы конструкций из КМ могут быть изготовлены из слоя с различным направлением армирования. В этой связи важно знать диссипативные свойства слоя в произвольно ориентированной системе координат. Для определения диссипативных свойств заменим в формуле (5.3) напряжения и деформации их выражениями в новой системе координат $(1', 2', 3')$ /6/, которые представим в матричной форме:

$$\{\sigma'\} = [g]\{\sigma\}; \{\varepsilon'\} = [q]\{\varepsilon\}; \{\sigma\} = \{\sigma'\}[q]; \{\varepsilon\} = \{\varepsilon'\}[g]. \quad (5.6)$$

Тогда из формулы (5.3) получим

$$[q] = \begin{bmatrix} \psi'_{11} & \psi'_{12} & 0 & 0 & 0 & \psi'_{16} \\ \psi'_{21} & \psi'_{22} & 0 & 0 & 0 & \psi'_{26} \\ 0 & 0 & \psi'_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \psi'_{44} & \psi'_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \psi'_{45} & \psi'_{55} & 0 \\ \psi'_{61} & \psi'_{62} & 0 & 0 & 0 & \psi'_{66} \end{bmatrix}; \begin{aligned} [\psi'] &= [g][\psi][q]^T; \\ [P'] &= [q][P][q]^T; \\ [U'] &= [g][U][g]^T; \\ [a'] &= [q][a][q]^T; \\ [A'] &= [g][A][g]^T. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Видно, что податливодиссипативная матрица $[P]$ преобразуется подобно матрице податливости $[a]$, а упругодиссипативная матрица $[U]$ — матрица упругости $[A]$. Матрицы преобразований $[q]$ и $[g]$ в общем виде и для системы координат, повернутой вокруг оси 3 на угол φ , представлены, например, в работе /6/.

Подставляя их в (5.7), получим для матриц $[\psi]$, $[P]$ и $[U]$ связь компонент в новой системе $(1', 2', 3')$ ψ'_{ij} , P'_{ij} и U'_{ij} с компонентами в осях $(1, 2, 3)$ ψ_i , P_{ij} и U_{ij} .

$$\begin{aligned} \psi'_{ii} &= \psi_i c^4 + \psi_j s^4 + 2\psi_6 s^2 c^2; \quad \psi'_{12} = \psi'_{21} = (\psi_1 + \psi_2 - 2\psi_6) s^2 c^2; \\ \psi'_{i6} &= [(-1)^i c^2 \psi_i + (-1)^j s^2 \psi_j + (-1)^j (c^2 - s^2) \psi_6] s c; \quad \psi'_{33} = \psi_3; \\ \psi'_{mm} &= \psi_m c^2 + \psi_n s^2; \quad \psi'_{45} = (\psi_4 - \psi_5) s c; \quad \psi'_{6i} = [(-1)^i c^2 \psi_i + \\ &+ (-1)^j s^2 \psi_j + (-1)^i (c^2 - s^2) \psi_6] 2 c s; \quad \psi'_{66} = 2 c^2 s^2 (\psi_1 + \psi_2) + \psi_6 (c^2 - s^2)^2; \\ P'_{ii} &= P_{ii} c^4 + P_{jj} s^4 + (2 P_{12} + P_{66}) s^2 c^2; \quad P'_{i3} = P_{i3} c^2 + P_{j3} s^2; \\ P'_{12} &= (P_{11} + P_{22} - 2 P_{12} - P_{66}) s^2 c^2 + P_{12}; \quad P'_{36} = 2 (P_{23} - P_{13}) s c; \quad P'_{33} = P_{33}; \end{aligned}$$

$$P'_{66} = [2(-1)^i c^2 P_{ii} + 2(-1)^j s^2 P_{jj} + (-1)^j (2P_{12} + P_{66})(c^2 - s^2)] s c; P'_{mm} = \\ = P_{mm} c^2 + P_{nn} s^2; P'_{45} = (P_{44} - P_{55}) s c; P'_{66} = P_{66} + 4(P_{11} + P_{22} - 2P_{12} - P_{66}) s^2 c^2;$$

$$U'_{ii} = U_{ii} c^4 + U_{jj} s^4 + 2(U_{12} + 2U_{66}) s^2 c^2; U'_{23} = U'_{13} c^2 + U_{j3} s^2; \\ U'_{12} = (U_{11} + U_{22} - 4U_{66}) s^2 c^2 + U_{12} (s^4 + c^4); U'_{36} = (U_{23} - U_{13}) 2 s c; \\ U'_{66} = [(-1)^j c^2 U_{ii} + (-1)^i s^2 U_{jj} + (-1)^i (U_{12} + 2U_{66})(c^2 - s^2)] s c;$$

$$U'_{mm} = U_{mm} c^2 + U_{nn} s^2; U'_{45} = (U_{44} - U_{55}) s c; U'_{33} = U_{33};$$

$$U'_{66} = (U_{11} + U_{22} - 2U_{12} - 2U_{66}) s^2 c^2 + U_{66} (s^4 + c^4), \quad (5.8)$$

где $c = \cos \varphi$; $s = \sin \varphi$; $i, j = 1, 2$; $i \neq j$; $m, n = 4, 5$; $m \neq n$.

Полученная матрица диссипации $[\psi']$ является несимметричной. Матрицы $[P']$ и $[U']$ симметричны только в силу принятого допущения $\psi'_{ij} = 0,5(\psi'_{ji} + \psi'_{ij})$. Приведенное выражение (5.8) относится к диссипативным свойствам ортотропного слоя в произвольной системе координат при объемном напряженном состоянии. Шесть компонентов диссипации $\psi'_1, \psi'_2, \dots, \psi'_6$ являются независимыми.

Рассмотрим некоторые частные случаи.

Одноосное нагружение $\sigma'_{11} = \sigma'_1 \neq 0$ (плоское деформированное состояние $\varepsilon'_1 = \sigma'_1 / a'_{11}$; $\varepsilon'_2 = -\mu'_{12} \varepsilon'_1$; $\varepsilon'_6 = \nu'_{1,12} \varepsilon'_1$).

При таком нагружении энергия диссипации, потенциальная энергия и техническая постоянная диссипации ψ'_1 в различной записи (см. (5.3))

$$\Delta W = 0,5 \sigma'_1 \sum_{i,2,6} \varepsilon'_i \psi'_i = 0,5 P'_{11} \sigma'^2_1 = 0,5 \left[\sum_{i,2,6} U'_{ii} \varepsilon'^2_i + 2(U'_{12} \varepsilon'_1 \varepsilon'_2 + \right. \\ \left. + U'_{16} \varepsilon'_1 \varepsilon'_6 + U'_{26} \varepsilon'_2 \varepsilon'_6) \right]; W = 0,5 \sigma'_1 \varepsilon'_1 = 0,5 \sigma'_1 a'_{11} = 0,5 \varepsilon'^2_1 A'_{11}; \\ \psi'_1 = [U'_{11} + U'_{22} \mu'^2_{12} + U'_{66} \nu'^2_{1,12} + 2(U'_{12} \mu'_{12} + U'_{16} \nu'_{1,12} + U'_{26} \mu'_{12} \nu'_{1,12})] / A'_{11}; \\ \psi'_1 = \psi'_{11} - \psi'_{12} \mu'_{12} + \psi'_{16} \nu'_{1,12}; \quad \psi'_1 = P'_{11} / a'_{11}. \quad (5.9)$$

Последнее выражение, как наиболее простое, позволяет с учетом (5.8) записать ψ'_i через упругие и диссипативные свойства однонаправленного КМ,

$$\psi'_i = \left[\frac{\psi_1}{E_1} C^4 + \frac{\psi_2}{E_2} S^2 + \left(\frac{\psi_6}{G_{12}} - \frac{2\mu_{12}\psi_1}{E_1} \right) S^2 C^2 \right] \left[\frac{C^4}{E_1} + \frac{S^4}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\mu_{12}}{E_1} \right) S^2 C^2 \right]^{-1} \quad (5.10)$$

Чистый тангенциальный сдвиг $\sigma'_6 \neq 0$ (плоское деформированное состояние $\varepsilon'_1 = \nu'_{12,1} \varepsilon'_6$; $\varepsilon'_2 = \nu'_{12,2} \varepsilon'_6$; $\varepsilon'_6 = \sigma'_6 a'_{66}$).

Поступая как и в предыдущем случае, можно записать:

$$\begin{aligned} \psi'_6 &= \psi'_{66} + \nu'_{12,1} \psi'_{61} + \nu'_{12,2} \psi'_{62}; & \psi'_6 &= P'_{66} / a'_{66} & \text{или} \\ \psi'_6 &= \left[\left(\frac{\psi_1(1+2\mu_{12})}{E_1} + \frac{\psi_2}{E_2} - \frac{\psi_6}{G_{12}} \right) \tilde{S}^2 + \frac{\psi_6}{G_{12}} \right] \left[\left(\frac{1+2\mu_{12}}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) \tilde{S}^2 + \frac{1}{G_{12}} \right]^{-1}, \\ \text{где } \tilde{S} &= \sin 2\varphi. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Если за меру рассеянной энергии принят логарифмический декремент колебаний, то с учетом соотношения $\psi = 2\delta$ по аналогии с матрицами $[\psi]$, $[\rho]$, $[U]$ можно ввести матрицу демпфирования $[\delta]$, податливо- $[\bar{\rho}]$ и упругодемпфирующие $[\bar{U}]$ матрицы. Компоненты этих матриц для ортотропного слоя в произвольной системе координат δ'_{ij} , $\bar{\rho}'_{ij}$, $\bar{U}'_{ij}$ определяются по формулам, аналогичным (5.8 - 5.10), где вместо ψ_i подставляются δ_i - логарифмические декременты колебаний при чистых видах НДС.

Экспериментальные исследования диссипативных свойств различных материалов, в том числе и композиционных /39,46/, свидетельствуют о том, что логарифмический декремент колебаний многих из них зависит от уровня нагружения и может быть представлен с достаточной степенью приближения в виде

$$\delta_i = c_i \varepsilon_{ii}^{\alpha_i - 1}, \quad (5.12)$$

где c_i и α_i - экспериментально определяемые параметры.

Используя выражения для компонентов податливо-диссипативной матрицы (см. формулу 5.8) и учитывая (5.12), получим зависимость логарифмического декремента колебаний произвольно армированного слоя от амплитуды деформации:

$$\begin{aligned} \delta'_{ii} &= c_i \varepsilon_{ii}^{\alpha_i - 1} C^4 + c_j \varepsilon_{jj}^{\alpha_j - 1} S^4 + 2c_6 \varepsilon_{66}^{\alpha_6 - 1} S^2 C^2; & \delta'_{33} &= c_3 \varepsilon_{33}^{\alpha_3 - 1}; \\ \delta'_{12} &= (c_1 \varepsilon_{11}^{\alpha_1 - 1} + c_2 \varepsilon_{22}^{\alpha_2 - 1} - 2c_6 \varepsilon_{66}^{\alpha_6 - 1}) S^2 C^2; & \delta'_{mm} &= c_m \varepsilon_{mm}^{\alpha_m - 1} C^2 + c_n \varepsilon_{nn}^{\alpha_n - 1} S^2; \end{aligned}$$

$$\sigma'_{i6} = [(-1)^i c^2 c_i \varepsilon_{ii}^{\alpha_i-1} + (-1)^j s^2 c_j \varepsilon_{jj}^{\alpha_j-1} + (-1)^j (c^2 - s^2) c_6 \varepsilon_{66}^{\alpha_6-1}] s c;$$

$$\sigma'_{ji} = [(-1)^i c^2 c_i \varepsilon_{ii}^{\alpha_i-1} + (-1)^j s^2 c_j \varepsilon_{jj}^{\alpha_j-1} + (-1)^i (c^2 - s^2) c_6 \varepsilon_{66}^{\alpha_6-1}] 2 s c;$$

$$\sigma'_{66} = 2 c^2 s^2 (c_1 \varepsilon_{11}^{\alpha_1-1} + c_2 \varepsilon_{22}^{\alpha_2-1}) + c_6 \varepsilon_{66}^{\alpha_6-1} (c^2 - s^2)^2; \quad \sigma'_{45} = (c_4 \varepsilon_{44}^{\alpha_4-1} - c_5 \varepsilon_{55}^{\alpha_5-1}) s c. \quad (5.13)$$

Формула (5.13) может быть представлена и через амплитуду напряжения. Таким образом, при определении амплитудно-зависимого демпфирования необходимо знать НДС.

5.1.2. Приближенное определение диссипативных свойств композиционных материалов

Логарифмический декремент колебаний анизотропного материала при объемном напряженном состоянии в общем случае может быть представлен с учетом формулы (5.3) в виде

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \tilde{\sigma}_{ij} a_{ij} \sigma_{ii} \sigma_{jj}}{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 a_{ij} \sigma_{ii} \sigma_{jj}} = \frac{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \tilde{\sigma}_{ij} A_{ij} \varepsilon_{ii} \varepsilon_{jj}}{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 a_{ij} \sigma_{ii} \sigma_{jj}}. \quad (5.14)$$

При однокомпонентном нагружении $\sigma_{SS} \neq 0$ (объемное деформированное состояние)

$$\sigma = \sigma_{SS} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \bar{\sigma}_{ij} \bar{A}_{ij} \bar{\varepsilon}_{ii} \bar{\varepsilon}_{jj}, \quad (5.15)$$

где $\bar{\sigma}_{ij} = \tilde{\sigma}_{ij} \sigma_{SS}^{-1}$; $\bar{A}_{ij} = A_{ij} \alpha_{SS}$; $\bar{\varepsilon}_{ii} = \varepsilon_{ii} \varepsilon_{SS}^{-1}$; $\bar{\varepsilon}_{jj} = \varepsilon_{jj} \varepsilon_{SS}^{-1}$.

Формула (5.15) позволяет получить различные частные случаи, например аналогичные приведенным в формулах (5.9-5.11). При этом вместо ψ'_i и ψ'_j следует подставлять соответственно $\bar{\sigma}'_i$ и $\bar{\sigma}'_j$.

Приближенное определение диссипативных свойств предполагает, что $\bar{\sigma}'_{ij} = 1$. Тогда на основе выражения (5.9)

$$\bar{\sigma}'_i = \bar{\sigma}'_{11} [1 + \mu_{12}^2 \bar{A}'_{22} + \nu_{1,12}^2 \bar{A}'_{66} + 2(\mu'_{12} \bar{A}'_{12} + \nu'_{1,12} \bar{A}'_{16} + \mu'_{12} \nu'_{1,12} \bar{A}'_{26})]. \quad (5.16)$$

Если допустить, что $\bar{A}'_{ij} = 1$ и $\bar{\sigma}'_{ij} (i \neq j) = 0$, логарифмический декремент колебаний ортотропного слоя с углом армирования φ при одно-

компонентном (чистом) циклическом растяжении (сжатии) $\sigma_j' (\sigma_j' \neq 0)$, тангенциальном сдвиге $\sigma_6' (\sigma_6' \neq 0)$, поперечном сдвиге $\sigma_p' (\sigma_p' \neq 0)$ и нормальном обжатии $\sigma_3' (\sigma_3' \neq 0)$ приближенно можно определить по формуле

$$\sigma_j' = \sum_{i=1}^3 \tilde{\sigma}_{ii}' \mu_{ji}^2 + \tilde{\sigma}_{66}' \nu_{j,12}^2; \quad \sigma_6' = \sum_{i=1}^3 \tilde{\sigma}_{ii}' \nu_{12,i}^2 + \tilde{\sigma}_{66}';$$

$$\sigma_p' = \tilde{\sigma}_{pp}' + \tilde{\sigma}_{qq}' \eta_{pp,qq}^2; \quad \sigma_3' = \sum_{i=1}^3 \tilde{\sigma}_{ii}' \mu_{3i}^2 + \tilde{\sigma}_{66}' \nu_{3,12}^2, \quad (5.17)$$

где $j = 1, 2$; $p, q = 4, 5$; $p \neq q$; $\mu_{jj} = 1$.

Если дополнительно принять, что $\tilde{\sigma}_{ii}' \approx \tilde{\sigma}_{66}'$ и $\tilde{\sigma}_{pp}' \approx \tilde{\sigma}_{qq}'$, то формулу (5.17) можно представить в виде

$$\sigma_1' = \tilde{\sigma}_{11}' [1 + \mu_{12}^2(\varphi) + \mu_{13}^2(\varphi) + \nu_{1,12}^2(\varphi)]; \quad \sigma_4' = \tilde{\sigma}_{44}' (1 + \eta_{44,55}^2);$$

$$\sigma_2' = \tilde{\sigma}_{22}' [1 + \mu_{21}^2(\varphi) + \mu_{23}^2(\varphi) + \nu_{2,12}^2(\varphi)]; \quad \sigma_5' = \tilde{\sigma}_{55}' (1 + \eta_{55,44}^2);$$

$$\sigma_6' = \tilde{\sigma}_{66}' (1 + \nu_{12,1}^2 + \nu_{12,2}^2 + \nu_{12,3}^2); \quad \sigma_3' = \tilde{\sigma}_{33}' (1 + \mu_{31}^2 + \mu_{32}^2 + \nu_{3,12}^2), \quad (5.18)$$

где $\tilde{\sigma}_{11}' = \tilde{\sigma}_1 c^4 + \tilde{\sigma}_2 s^4 + 2\tilde{\sigma}_6 s^2 c^2$; $\tilde{\sigma}_{44}' = \tilde{\sigma}_4 c^2 + \tilde{\sigma}_5 s^2$;
 $\tilde{\sigma}_{22}' = \tilde{\sigma}_1 s^4 + \tilde{\sigma}_2 c^4 + 2\tilde{\sigma}_6 s^2 c^2$; $\tilde{\sigma}_{55}' = \tilde{\sigma}_5 c^2 + \tilde{\sigma}_4 s^2$;
 $\tilde{\sigma}_{66}' = (\tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_2) 2c^2 s^2 + \tilde{\sigma}_6 (c^2 - s^2)$; $\tilde{\sigma}_{33}' = \tilde{\sigma}_3$.

Если дополнительно принять $\mu_{12}(\varphi) = \mu_{13}(\varphi) = 0$, то получим частный случай для σ_1' , совпадающий с формулой (6)/39/. Допуская также $\nu_{1,12}(\varphi) = 0$, что справедливо для ортотропных кососимметричных многослойных систем, приходим к формуле (3.32) /9/.

5.1.3. Диссипативные свойства слоистых композитов

Реальные конструкции из композиционных материалов представляют собой системы, состоящие из слоев (однонаправленных или трансверсально изотропных и ортотропных), армированных под различными углами (см. рис. 1.1). Поэтому важно определить рассеяние энергии в слоистом композите по упруго-податливо-диссипативным свойствам монослоев. Для решения этой задачи необходимо знать закономерности деформирова-

нии слоистой системы, которые устанавливаются на основе принятой теории пластин. В работе /4I/ данная задача решена с применением классической теории пластин. Здесь используется уточненная теория слоистых анизотропных пластин /2I/, согласно которой деформации имеют вид

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon\}\{f\}, \quad (5.19)$$

где $\{\varepsilon_0\}$ — матрица-столбец деформаций координатной плоскости;
 $\{f\}$ — матрица-столбец функций перемещений;
 $\{\varepsilon\}$ — матрица деформаций изгиба, трансверсального сдвига, скручивания и обжатия.

В общей системе координат они имеют вид

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ 0 \\ \varepsilon_{23}^0 \\ \varepsilon_{13}^0 \\ \omega_1 + \omega_2 \end{Bmatrix}; \{f\} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_{1,3} \\ f_{2,3} \\ f_{3,3} \end{Bmatrix}; \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 & \varphi_1 & \psi_1 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_2 & \varepsilon_2 & \psi_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_3 \\ 0 & 0 & \theta_2 & 0 & \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_1 & \theta_1 & 0 & 0 \\ \psi_1 + \psi_2 & \psi_2 + \psi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}. \quad (5.20)$$

Следует отметить, что приведенные ранее зависимости (5.1)–(5.19) справедливы для отдельного слоя. Так, удельная энергия рассеяния каждого i -го слоя за цикл нагружения $\Delta W^{(i)}$ относительно общей системы координат определяется параметрами слоя аналогично формуле (5.3):

$$\Delta W^{(i)} = 0,5 \{\sigma^{(i)}\}^T [P^{(i)}] \{\sigma^{(i)}\}; \Delta W^{(i)} = 0,5 \{\varepsilon^{(i)}\}^T [U^{(i)}] \{\varepsilon^{(i)}\}. \quad (5.21)$$

Компоненты матриц $[P^{(i)}]$ и $[U^{(i)}]$ вычисляются через компоненты в собственной (местной) системе координат по формулам преобразований (5.8). Послойно интегрируя по толщине пакета H выражение (5.21) с учетом (5.19) и (5.20), получим удельную энергию рассеяния сложного КМ в объеме $l \times l \times H$ в виде

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \int_{z_i}^{z_{i+1}} \Delta W^{(i)} dz = 0,5 \{ \varepsilon_0 \}^T [y_0] \{ \varepsilon \} + 2 \{ \varepsilon_0 \}^T [y_1] \{ \varepsilon \} + \{ \varepsilon \}^T [y_2] \{ \varepsilon \}, \quad (5.22)$$

где $[y_j] = \sum_{i=1}^n \int_{z_i}^{z_{i+1}} [U^{(i)}] \{f\}^j dz.$

Энергию диссипации можно выразить также через силовые факторы (усилия, моменты, полимоменты), предварительно связав их с деформациями. Удельная потенциальная энергия слоистого пакета определяется выражением (5.22), где $[U^i]$ следует заменить на $[A^i]$, а ΔW - на W . Тогда коэффициент поглощения слоистого КМ равен

$$\psi = \frac{\{\varepsilon_0\}^T [y_0] \{\varepsilon\} + 2\{\varepsilon_0\}^T [y_1] \{x\} + \{x\}^T [y_2] \{x\}}{\{\varepsilon_0\}^T [c_0] \{\varepsilon\} + 2\{\varepsilon_0\}^T [c_1] \{x\} + \{x\}^T [c_2] \{x\}}, \quad (5.23)$$

где $[c_j] = \sum_{i=1}^n \int_{z_i}^{z_{i+1}} [A^i] \{f\} dz$.

5.1.4. Диссипативные свойства композитных конструкций

Коэффициент поглощения энергии конструкцией (K) из КМ и ее декремент колебаний определяются по формуле

$$\psi_K = \Delta W_K W_K^{-1}; \quad \sigma_K \approx 0,5 \psi_K, \quad (5.24)$$

где $\Delta W_K = \int_V \Delta W dV$ - энергия рассеяния;
 $W_K = \int_V W dV$ - потенциальная энергия;
 V - объем конструкций.

При определении ΔW_K и W_K необходимо знать НДС как по толщине, так и в плане $\Omega(\alpha_1, \alpha_2)$. В первом приближении можно определить НДС при свободных колебаниях, считая справедливым правило Видлера. Такое НДС достаточно хорошо согласуется и с экспериментом. С учетом выражения (5.22) коэффициент поглощения для конструкции можно записать в виде

$$\psi_K = \frac{\iint_{\Omega} (\{\varepsilon_0\}^T [y_0] \{\varepsilon\} + 2\{\varepsilon_0\}^T [y_1] \{x\} + \{x\}^T [y_2] \{x\}) d\Omega}{\iint_{\Omega} (\{\varepsilon_0\}^T [c_0] \{\varepsilon\} + 2\{\varepsilon_0\}^T [c_1] \{x\} + \{x\}^T [c_2] \{x\}) d\Omega}. \quad (5.25)$$

В качестве примера определим демпфирующие свойства ортотропной шарнирно опертой пластины. Пластина находится в условиях плоского неоднородного напряженного состояния ($\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{66}$), соответствующего теории Кирхгофа-Лява. При колебаниях по $m\eta$ -й форме действуют напряжения $/II/$

$$\sigma_{11} = A_{11} z W_0 (\pi^2 a^{-2} + \mu_{21} n^2 \pi^2 b^{-2}) \sin(m\pi a^{-1} x) \sin(n\pi b^{-1} y);$$

$$\begin{aligned}\sigma_{22} &= A_{22} Z W_0 (n^2 \pi^2 b^{-2} + \mu_{12} m^2 \pi^2 a^{-2}) \sin(m\pi a^{-1}x) \sin(n\pi b^{-1}y); \\ \sigma_{66} &= -2\sigma_{12} Z W_0 m n \pi^2 (ab)^{-1} \cos(m\pi a^{-1}x) \cos(n\pi b^{-1}y).\end{aligned}$$

и деформации

$$\begin{aligned}\epsilon_{11} &= Z W_0 m^2 \pi a^{-2} \sin(m\pi a^{-1}x) \sin(n\pi b^{-1}y); \\ \epsilon_{22} &= Z W_0 n^2 \pi b^{-2} \sin(m\pi a^{-1}x) \sin(n\pi b^{-1}y); \\ \epsilon_{66} &= -Z W_0 m n \pi^2 (ab)^{-1} \cos(m\pi a^{-1}x) \cos(n\pi b^{-1}y),\end{aligned}\quad (5.26)$$

где W_0 - амплитуда колебаний.

Используя с учетом формулы (5.26) формулу (5.24), получим декремент колебаний шарнирно опертой ортотропной ($\pm\varphi$) пластины в виде

$$\delta^{\kappa} = \frac{\delta_{11}^{-1} + E\sigma^2 \delta_{22}^{-1} - 2\mu_{12} \sigma \delta_{12}^{-1} + 4\sigma_{12} E_1^{-1} (1 - \mu_{12}\mu_{21})^2 \kappa \delta_{66}^{-1}}{1 + E\sigma^2 - 2\mu_{12}\sigma + 4\sigma_{12} E_1^{-1} (1 - \mu_{12}\mu_{21})^2 \kappa}, \quad (5.27)$$

где $\sigma = (n^2 c^2 + \mu_{12} m^2)(E m^2 + \mu_{12} n^2 c^2)^{-1}$; $\kappa = m^2 n^2 c^2 (m^2 \mu_{21} n^2 c^2)^{-2}$;

$\sigma = ab^{-1}$; $E = E_1(\pm\varphi) E_2^{-1}(\pm\varphi)$; $\sigma_{12} = \sigma_{12}(\pm\varphi)$; $\mu_{ij} = \mu_{ij}(\pm\varphi)$.

Компоненты матрицы демпфирования δ_{ij}^{-1} определяются по формулам, аналогичным (5.8) для ψ_{ij}^{-1} или (5.13).

5.1.5. Определение технических постоянных диссипаций

Технические постоянные диссипации можно определить расчетным путем на основе структурных моделей и экспериментально на образцах.

При расчете обычно на основе моделей типа "смесей" учитывают только рассеяние энергии в наполнителе и матрице и пренебрегают диссипацией энергии на границе раздела компонентов КМ.

Наиболее развиты экспериментальные методы [42, 47]. Они позволяют получить и более достоверные данные. Здесь основными являются: методы резонансного пика и впадины амплитудной кривой; методы статической и динамической петли гистерезиса; фазовые и комбинированные методы; методы затухающих колебаний и "резонансной частоты", метод

нарастающих резонансных колебаний; энергетический и термический методы.

Для определения демпфирующих свойств КМ и конструкций в соответствии с принятой моделью диссипации (5.7) необходимо знать шесть независимых технических констант ψ_i или $\delta_i^0 (i=\overline{1,6})$. Они устанавливаются экспериментально при различных схемах циклического нагружения и в соответствии с формулой связи компонентов (табл. 5.3). Следует отметить, что создать при испытаниях КМ "чистый" вид нагружения (однородное однокомпонентное нагружение) практически невозможно. Представленные схемы реализации также обеспечивают его приближенно, хотя и с преобладающим действием необходимой компоненты δ_{ii}^0 . Для амплитудно-зависимого демпфирования (5.12) представленные в табл. 5.3 схемы нагружения реализуются дважды на различных уровнях ϵ_{ii} . Тогда параметры α_i и C_i определяются по формуле

$$\alpha_i = 1 + \frac{\ln \delta_{ii,2}^0 - \ln \delta_{ii,1}^0}{\ln \epsilon_{ii,2} - \ln \epsilon_{ii,1}}; \quad C_i = \frac{\delta_{ii,1}^0}{\epsilon_{ii,1}^{\alpha_i-1}} = \frac{\delta_{ii,2}^0}{\epsilon_{ii,2}^{\alpha_i-1}}, \quad (5.28)$$

где индекс после занятой показывает номер уровня нагружения.

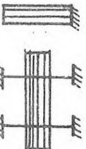
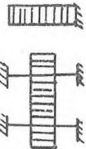
5.2. Влияние различных параметров на диссипативные свойства композиционных материалов и конструкций

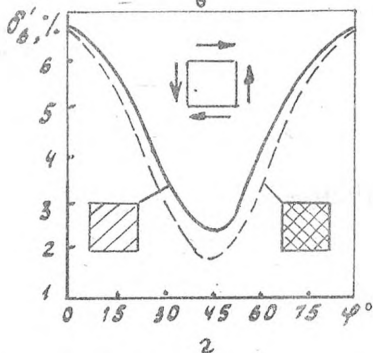
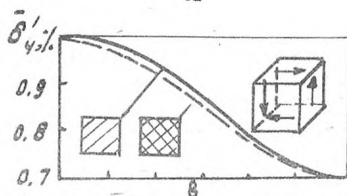
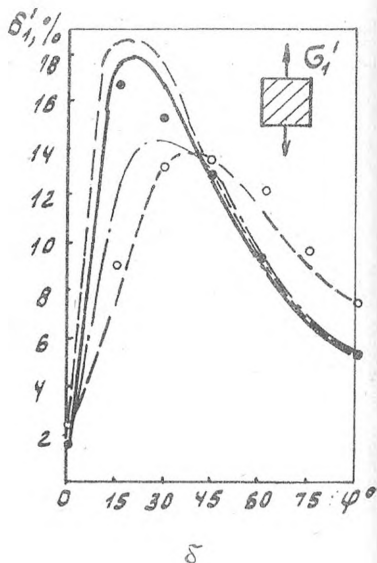
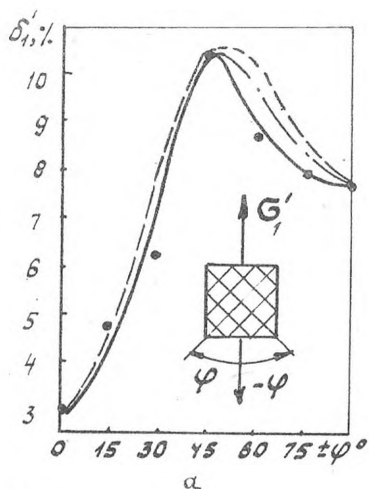
Влияние различных параметров на демпфирующие свойства стеклопластика ЭТФ-ВМІ, углепластика КМУ-Іл и пластин из КМ исследовано на основе результатов, полученных в предыдущем разделе. Экспериментальные данные для определения технических постоянных диссипации взяты из работ [39, 46]. Анализ результатов, представленных на рис. 5.1 5.2 позволил установить следующее.

Композиционные материалы обладают существенной анизотропией демпфирующих свойств. Максимум логарифмического декремента колебаний КМ при циклическом растяжении (сжатии) $\delta_1'(\varphi) = \delta_2'(90^\circ - \varphi)$ наблюдается при углах армирования $\varphi = \pm 45^\circ$, $\varphi = 15 \dots 25^\circ$ для КМУ-Іл и $\varphi = 30 \dots 45^\circ$ для ЭТФ-ВМІ. При тангенциальном сдвиге $\delta_6'_{\max} = \delta_6'(0^\circ, 90^\circ)$. Причем для симметричной структуры ($\pm \varphi$) декремент несколько ниже.

Максимум декремента при поперечном сдвиге $\delta_4'(\varphi) = \delta_5'(90^\circ - \varphi)$ наблюдается при $\varphi = 0^\circ$ или 90° в зависимости от соотношения δ_4/δ_5 .

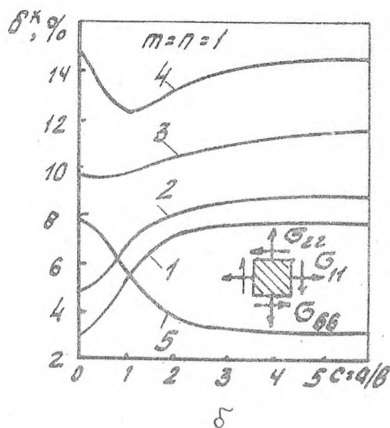
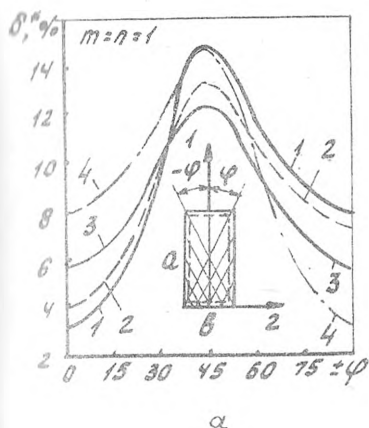
Определение технических постоянных диссипации

№ п/п	Экспериментальная характеристика	Вид НДС	Схема реализации	Технические постоянные диссипации (5.8)		Примечание
				формула определения	формула определения (5.18)	
1	δ_{11}^0			$\psi_1 = \psi_{11}^0 = \psi_{22}^{90}$	$\delta_1' = \frac{\delta_{11}^0}{1 + \mu_{12,0}^2 + \mu_{13,0}^2}$	$\psi = 2\delta$ $\delta_{11}^0 = \delta_{22}^{90}$
2	δ_{11}^{90}			$\psi_2 = \psi_{11}^{90} = \psi_{22}^0$	$\delta_2' = \frac{\delta_{11}^{90}}{1 + \mu_{12,90}^2 + \mu_{13,90}^2}$	$\delta_{11}^{90} = \delta_{22}^0$ $\psi_{90} = \psi_{22}^0$
3	δ_{33}^0		—	$\psi_3 = \psi_{33}^0 = \psi_{33}^{90}$	$\delta_3' = \frac{\delta_{33}^0}{1 + \mu_{31,0}^2 + \mu_{32,0}^2}$	$\delta_{33}^0 = \delta_{33}^{90}$
4	δ_{44}^0		—	$\psi_4 = \psi_{44}^0 = \psi_{55}^{90}$	$\delta_4 = \delta_{44}^0$	$\delta_{44}^0 = \delta_{55}^{90}$
5	δ_{55}^0		—	$\psi_5 = \psi_{55}^0 = \psi_{44}^{90}$	$\delta_5 = \delta_{55}^0$	$\delta_{55}^0 = \delta_{44}^{90}$
6	δ_{66}^0 δ_{11}^{45}		1.  2.  3. 	$\psi_6 = \frac{4\psi_{11}^{45} - \psi_{11}^0 - \psi_{22}^{90}}{2}$ $\psi_6' = \psi_{66}^0$	$\delta_6 = \Delta - \kappa(\delta_1' + \delta_2')$ $\Delta = \frac{\delta_{11}^{45}}{1 + \mu_{12}^2 + \mu_{13}^2 + \nu_{1,12}^2} (45^\circ)$	$\kappa \begin{cases} \delta_{12,45} = 0,5 \\ \delta_{12,90} = 0,25 \end{cases}$ $\mu_{1,ij} = \mu_{ij}(45^\circ)$



Р и с.5.1. Влияние угла армирования на логарифмический декремент колебаний при циклическом растяжении-сжатии (изгибе) (а, б), поперечном (в) и тангенциальном (г) сдвиге: а - ЭТФ-ВМІ ($\varepsilon_1 = 250 \cdot 10^{-5}$); расчет по формуле (5.16) —; (5.18) —•—; /39/ —---; б - КМУ-ІІІ ($\varepsilon_1 = 300 \cdot 10^{-5}$); расчет по формулам (5.18) — (5.10) —•—; /39/ —---; ЭТФ-ВМІ ($\varepsilon_1 = 150 \cdot 10^{-5}$); — /39/ —---; в - ЭТФ-ВМІ ($\varepsilon_1 = 250 \cdot 10^{-5}$); $\delta_5 \delta_4' \approx A_{44} A_{55} = 0,7$; г - КМУ-ІІІ ($\varepsilon_1 = 300 \cdot 10^{-5}$); •, о - эксперимент /39, 46/

При $\delta_4 = \delta_5$ декремент $\delta_4'(\pm\varphi) = \delta_5'(\pm\varphi) = \delta_4$, а $\delta_4'(\varphi)$ достигает максимума при $\varphi = 45^\circ$ для $G_{44} < G_{55}$. Если жесткости на межслойный сдвиг равны ($G_{44} = G_{55}$), то $\delta_4'(\varphi) = \delta_5'(\varphi) = \delta_4$. Следует отметить, что удовлетворительное совпадение результатов расчета по приближенным формулам с экспериментом обусловлено использованием



Р и с. 5.2. Влияние угла армирования (а) и удлинения (б) пластины из ЭФ-ВМІ ($E_1 = 250 \cdot 10^{-5}$) на логарифмический декремент колебаний при плоском напряженном состоянии: а - $c = 0$ (1); 0,5 (2); 1 (3); ∞ (4); б - $\pm \varphi = 0$ (1); 15 (2); 30 (3); 45 (4); 90 (5)

экспериментальных технических постоянных. В этом случае расчетная кривая $\delta'_i = \delta'_i(\varphi)$ "привязывается" к трем экспериментальным точкам - $\delta'_i(0^\circ)$, $\delta'_i(45^\circ)$ и $\delta'_i(90^\circ)$. Вместе с тем учет влияния эффектов Пуассона при определении δ'_i (5.24) снижает погрешность расчета примерно на 5%.

Демпфирование при циклическом обжати слабо зависит от угла армирования, хотя максимум его и наблюдается при $\varphi = 45^\circ$ и $\pm 45^\circ$. При этом диапазон его изменения для стеклопластика ЭФ-ВМІ и углепластика КМУ-ІІ составляет 2,5...3% при перекрестном ($\pm \varphi$) и 7,5...8% при однонаправленном (φ) армировании.

Максимальное значение декремента колебаний ортотропной шарнирно-опертой пластины наблюдается при $\varphi = \pm 45^\circ$. С ростом удлинения пластины $c = a\delta^{-1}$ происходит увеличение декремента колебаний при $\varphi < \pm 45^\circ$ и уменьшение при $\varphi > \pm 45^\circ$. Связано это с тем, что с увеличением c возрастает роль деформаций во втором направлении и вклад δ'_{22} в общий уровень диссипации энергии повышается, а роль δ'_{11} снижается.

Поэтому при $c = 0, \infty$ декремент колебаний δ^* изменяется:

$$\text{от } \delta^*(c=0) = [\delta'_{11} + \mu'_{12}\mu'_{21}(\delta'_{22} - 2\delta'_{12})](1 - \mu'_{12}\mu'_{21})^{-1}$$

$$\text{до } \delta^*(c=\infty) = [\delta'_{22} + \mu'_{12}\mu'_{21}(\delta'_{11} - 2\delta'_{12})](1 - \mu'_{12}\mu'_{21})^{-1}.$$

Так как $1 - \mu'_{12} \mu'_{21} \approx 1$, то $\delta^* = \delta'_{11}, \delta'_{22}$. Относительно низкое значение декремента колебаний при тангенциальном сдвиге δ'_6 и δ'_{66} при $\varphi = \pm 45^\circ$ приводит к минимуму δ^* при c/n , где n - число полуоволн в направлении стороны δ . Естественно, что увеличение n эквивалентно увеличению c .

5.3. Аэродинамическое демпфирование конструкций

Доля рассеянной энергии в воздушном (газовом) потоке от взаимодействия с ним элементов конструкции из КМ в общем объеме энергии диссипации в силу малой плотности материала может быть значительной. Здесь представлены результаты исследования влияния различных факторов на аэродинамическое демпфирование лопаток из КМ, которое приближенно оценивается расчетным путем на основе нестационарной теории /49/. При этом рассматриваются малые гармонические колебания одиночного профиля прямоугольного сечения в плоском потоке и пренебрегается изменением скорости потока по длине лопатки. Для пластин постоянного прямоугольного сечения декремент изгибных δ'_{i0} и крутильных δ'_{i1} колебаний при нулевом угле атаки приближенно можно оценить по формулам /50/

$$\delta'_{i0} = \pi^2 \rho_0 V F(\bar{\kappa}_{i0}) (\rho h \omega_{i0})^{-1}; \quad (5.29)$$

$$\delta'_{i1} = 3\pi^2 \rho_0 V P(\bar{\kappa}_{i1}, x) (\rho h \omega_{i1})^{-1}, \quad (5.30)$$

где ρ_0 - плотность обтекающего профиля потока; V - скорость потока; ρ - плотность материала пластин; ω_{i0}, ω_{i1} - угловая частота соответственно изгибных и крутильных колебаний по i -й собственной форме; $F(\bar{\kappa})$ - действительная часть функции Теодорсена; $P(\bar{\kappa}, x)$ - функция, зависящая от $F(\bar{\kappa})$, коэффициента мнимой части функции Теодорсена $G(\bar{\kappa})$ и $x = Z/b$; Z - расстояние от передней кромки до оси, относительно которой происходят крутильные колебания; b - полухорда профиля; $\bar{\kappa} = \omega b / V$ число Струхала; h - толщина пластины.

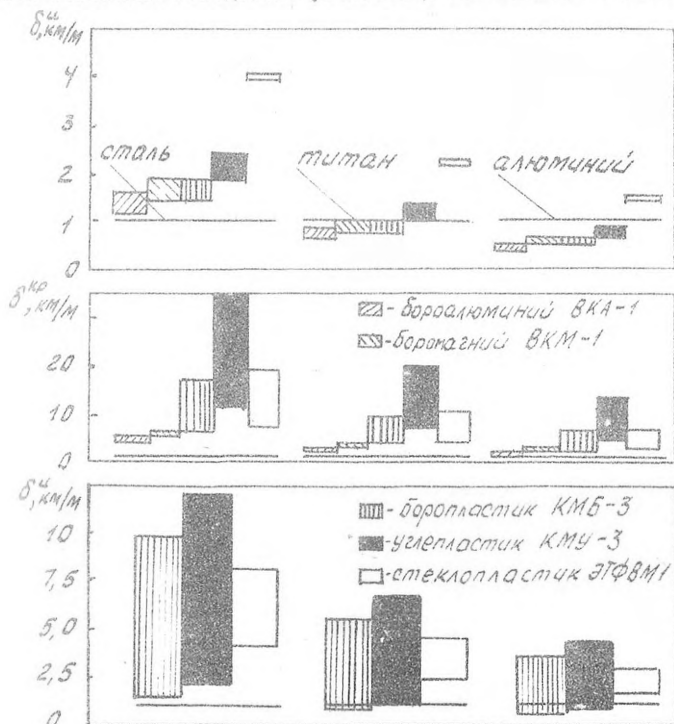
Аэродемпфирование при колебаниях по пластиночным формам, характеризующимся изгибом вдоль хорды, определяется зависимостью, аналогичной зависимости (5.29) для δ'_{i0} , но с учетом ω_{i2} .

Собственные частоты колебаний определяются на основе уточненной /21/ и классической /51/ теорий пластин.

Уровень аэродемпфирования может быть увеличен за счет уменьшения шага решетки, изменения угла атаки, уменьшения частоты колебаний

и плотности материала лопатки. Для композиционных материалов последние два фактора имеют существенное значение. Плотность КМ составляет $1,4 \dots 2,5 \text{ г/см}^3$, что существенно меньше плотности сталей и титана. Обладая неоднородностью и анизотропией свойств, эти материалы позволяют изменять в широких пределах собственные частоты колебаний. При уменьшении ω_{ij} аэродемпфирование возрастает, причем обратно пропорционально при больших частотах и еще существеннее при малых частотах за счет изменения режимов обтекания (увеличения коэффициентов $F(R)$ и $P(R, \alpha)$).

Сравнение уровня аэродемпфирования стержней из различных КМ и металлов свидетельствует о преимуществах композитов (рис. 5.3). Диапазон изменения $\delta_{ij}^{\text{кр}}$ однонаправленных КМ обусловлен возможным отличием режимов обтекания вследствие уменьшения собственных частот.



Р и с. 5.3. Сравнение уровня аэродемпфирования композитных и металлических стержней

5.4. Рассеяние энергии в слоистых покрытиях и вязкоупругих заполнителях

Создание полимерных и композиционных материалов, обладающих достаточно высокими демпфирующими характеристиками, открывает широкие возможности для разработки слоистых конструкций с высоким уровнем диссипативных свойств. Такие конструкции в общем случае представляют собою слоистые системы типа металл-металл, металл-полимер (клей, смола, герметик), металл-композит (на металлической и полимерной основе), металл-полимер-композит, композит-полимер и композит-композит. В зависимости от месторасположения демпфирующих слоев различают системы с заполнителем (слои расположены близко к нейтральной поверхности детали) и покрытием (демпфирующие слои расположены близко к наружным поверхностям детали). Рассеяние энергии в системе происходит при всех действующих компонентах деформаций (напряжений). Так как заполнитель в большей степени работает на поперечный сдвиг, основное рассеяние энергии происходит при поперечном сдвиге. Применение конструкций с покрытиями позволяет также использовать эффект диссипации энергии в мягком (демпфирующем) слое (слоях) покрытия при его поперечном сдвиге. При этом увеличение деформаций ϵ_{iz} происходит за счет наличия жестких (несущих) слоев, воспринимающих в основном напряжения растяжения (изгиба) и тангенциального сдвига. Рассеяние в жестких слоях при изгибных колебаниях происходит в большей степени от растяжения, при крутильных колебаниях — от тангенциального сдвига.

Слоистые конструкции позволяют получить высокие демпфирующие свойства путем рационального распределения мягких и жестких слоев по поверхности и толщине конструкции. Естественно, что уровень демпфирования будет зависеть от геометрии детали, покрытия и формы колебаний, уровня нагружения, структуры материала и упругодемпфирующих свойств слоев.

Эффективность нанесения тонкого ($h_n \ll h_0$) покрытия при колебаниях плоского стержня в условиях чистого изгиба (u) и приближенного можно оценить по формуле (50)

$$\sigma^u \approx \sigma_0^u (1 + 6 \sigma_n^u E_n h_n / \sigma_0^u E_0 h_0), \quad (5.31)$$

где σ_0^u — декремент колебаний стержня толщиной h_0 ; σ^u — декремент колебаний стержня с нанесенным с двух сторон покрытием; σ_n^u — декремент колебаний материала покрытия при амплитуде продольной де-

формации, равной амплитуде деформации наружного волокна стержня: E_σ, E_η модули Юнга материала стержня и покрытия.

Из формулы (5.31) следует, что параметр $E_n \sigma_n^u$ характеризует способность материала демпфировать конструкции при изгибных колебаниях, а параметр $E_\sigma \sigma_\sigma^u$ – склонность материала к демпфированию конструкций из него за счет покрытия. С увеличением $\sigma_n^u E_n h_n / \sigma_\sigma^u E_\sigma h_\sigma$ декремент колебаний возрастает. Если $\sigma_n^u E_n h_n \ll \sigma_\sigma^u E_\sigma h_\sigma$, то покрытие неэффективно. При чистом кручении (KP) эффективность покрытия будет характеризоваться параметром $E_n \sigma_n^{KP}$. Параметры $E \sigma^u$ и $E \sigma^{KP}$ будем называть виброжесткостью при изгибе и кручении соответственно. Их значения для металлов и композиционных материалов представлены в табл. 5.4. Видно, что наименьшей виброжесткостью обладает титан. Это

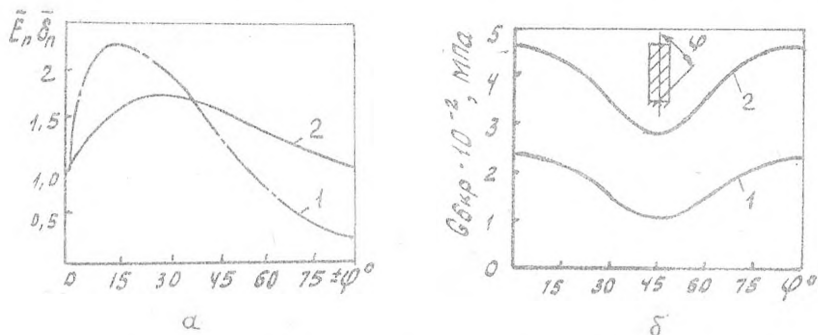
Т а б л и ц а 5.4

Виброжесткость различных материалов

Материал	Марка	Модуль $E \cdot 10^{-5}$, МПа	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-5}$, МПа	Декремент σ^u , %	Декремент σ^{KP} , %	$E \sigma^u \cdot 10$, МПа	$E \sigma^{KP} \cdot 10$, МПа
Сталь	40ХНМА	2,04	0,78	0,7	1,4	1428	1092
Титан	BT-8	1,1	0,42	0,03	0,06	33	25,2
Дюраль	ДИ6	0,71	0,27	0,65	1,3	462	351
Боролит	ВКА-1	2,5	0,1	0,6	1,2	1500	120
Боромат	ВКМ-1	2,2	0,1	0,6	1,2	1320	120
Боропластик	КМБ-3	2,5	0,085	1,8	6	4500	510
Углепластик	КМУ-3	1,8	0,03	1,6	10,9	2880	357
Остеклопластик	ЭТР-ВМ	0,48	0,07	2,8	6,6	1344	462

обусловлено его весьма низкими диссипативными свойствами. Наибольшей виброжесткостью при изгибе обладает боропластик КМБ-3, а при кручении – сталь. Эффективность применения композиционных материалов для

виброзащиты металлических деталей видна из табл. 5.4. При изгибных колебаниях наиболее эффективными являются покрытия из угле-, боропластика с углом армирования $\pm \varphi = 10...20^\circ$, при крутильных – из стекло-, боропластика с продольной ($\varphi = 0^\circ$) укладкой основы (рис. 5.4).

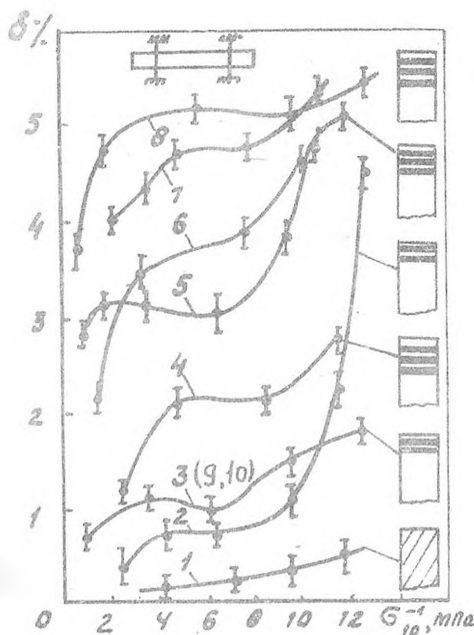


Р и с. 5.4. Влияние угла армирования на виброжесткость покрытия из КМ при изгибе (а) и кручении (б): 1 – КМЖ-ІІ; 2 – ЭТО-ВМІ

При разработке эффективных демпфирующих слоистых покрытий следует руководствоваться основными принципами их проектирования. Распределение демпфирующих слоев по поверхности и толщине конструкций должно соответствовать распределению действующих вибрационных деформаций и напряжений. Это означает, что в каждой области детали должно располагаться покрытие (слой), наиболее эффективно рассеивающее энергию при деформациях, преобладающих в данной области. В качестве демпфирующих должны использоваться слои с существенно большими диссипативными свойствами, чем у основного материала, а в качестве покрытия – системы, обладающие существенно большей виброжесткостью.

Рассмотрим эффективность применения слоистых покрытий для повышения демпфирующих свойств титановых лопаток компрессора (20). На рис. 5.5 приведена зависимость логарифмического декремента изгибных колебаний свободно подвешенных на струнах пластин из титана с различной структурой двухстороннего покрытия от уровня амплитуды напряжений. Видно, что образцы с покрытием по сравнению с титановой пластиной имеют значительно больший декремент колебаний. Его уровень возрастает с ростом амплитуды напряжений, наибольший декремент колебаний наблюдается для многослойного покрытия № 8 и составляет 5,4% при

амплитуде напряжений 120 МПа. Следует отметить, что демпфирующие свойства покрытий № 3 и 10 примерно одинаковы, а образца № 9 — не-



Р и с. 5.5. Зависимость логарифмического декремента колебаний слоистых элементов от структуры покрытия и амплитуды напряжений: 1 — Ti без покрытия; 2 — $(A/K/Ti)_s$; 3 — $(A/K/A/K/Ti)_s$; 4 — $(2A/K/A/K/A/K/Ti)_s$; 5 — $(Cm/K/Cm/K/A/K/Ti)_s$; 6 — $(A/K/1,5A/K/Cm/K/Ti)_s$; 7 — $(A/2K/A/2K/Ti)_s$; 8 — $(2A/K/1,5A/K/A/K/Ti)_s$; A — слой дюрала Д16АТ (толщина $h = 0,1$ мм); 2A ($h = 0,2$); Ст — слой стали 12Х18Н10Т ($h = 0,1$); К — клей ВК-3 ($h = 0,1$); Ti — титан ($h = 5$); 9 — $(A/2K/Ti)_s$; 10 — $((A/K)_3Ti)_s$

сколько выше. Увеличение числа комбинированных

(А/к) слоев и толщины в них

клевого слоя повышает диссипацию энергии (сравнить кривые 2, 3, 7). Расположение слоев в покрытии в порядке возрастания упругих свойств или жесткости приводит к повышению деформаций поперечного сдвига и к росту демпфирования (см. образцы № 7 и 8).

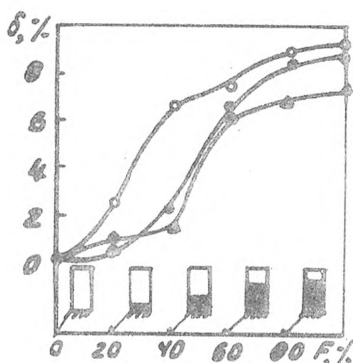
При изгибных и высших крутильных и пластиночных формах колебаний лопаток наиболее эффективно применение двух типов покрытий, реализующих рассеяние энергии при поперечном сдвиге (особенно в средней части лопатки) и растяжении (в зоне корня лопаток). Это следует из анализа распределения деформаций (напряжений) при колебаниях по этим формам. Естественно, что, увеличивая площадь покрытия, работающего при поперечном сдвиге, и распространяя его от корня к периферии, мы повышаем диссипацию энергии (см. рис. 5.6). Для низших крутильных форм колебаний может быть эффективным применение в средней части пера

покрытия, рассеивающего энергию при тангенциальном сдвиге.

В заключение отметим, что применение слоистых покрытий имеет ряд существенных преимуществ перед конструкционным демпфированием, реализуемым в демпферных устройствах.

Во-первых, слоистые покрытия позволяют демпфировать конструкцию при колебаниях по различным формам в широком диапазоне частот. Во-вторых, этот способ демпфирования не требует значительных доработок конструкции, не усложняет ее, не создает дополнительных концентраторов напряжений (вырезы, отверстия и т.д.). В этой связи он может применяться, например, для тонких и малогабаритных лопаток, где постановка демпферов затруднительна. Этот способ также может использоваться как ремонтный при доводке и эксплуатации изделий. В-третьих, слоистые покрытия в ряде случаев выступают как защита от эрозии, коррозии и механических повреждений основного несущего слоя пера лопатки или других элементов.

Высокие демпфирующие свойства вязкоупругих прослоек, и в частности герметика 5I-Г-I, могут использоваться для повышения вибропрочности металлических деталей ГТД /52/. Так, например, пропитка герметиком 5I-Г-I сотового заполнителя ЗПК из титана (удельный вес от пропитки возрастает на 4%) приводит к росту логарифмического декремента колебаний в 2 раза (до 16 ... 17%) при $\sigma = 25$ МПа, предела выносливости - в 2...3 раза и длительности наработки до разрушения N_u - в 10 раз. При этом снижается возбудимость резонансных колебаний в 6 раз, т.е. при одном и том же уровне возбуждающего колебания усилия возникающий уровень максимальных деформаций (напряжений) уменьшается примерно в 6 раз по отношению к ЗПК без герметика. Следует отметить, что величина δ зависит от уровня нагружения (обычно δ возрастает с ростом σ) и частоты колебаний. Как правило, интенсивность роста δ от σ с увеличением f_{mn} возрастает.



Р и с. 5.6. Влияние площади покрытия ($A/K/A/K/Г$), на декремент изгибных колебаний лопатки: $\sigma = 10$ МПа ($\triangle$); 130 ($\circ$); 150 ($\square$)

5.5. Выносливость и вибропрочность композиционных материалов и конструкций

Нарушение прочности КМ при длительном циклическом нагружении называется усталостью. При этом сопротивление усталостному разрушению характеризуется кривой усталости (кривой Веллера) — зависимостью амплитуды напряжений (σ) от числа циклов нагружения (N_u) до разрушения. Так как кривая Веллера для КМ не имеет горизонтальной амплитуды (σ с ростом N_u убывает), то ограниченным пределом выносливости (на данной базе) называют максимальные напряжения, при которых образец (деталь) выдерживает заданную базу испытаний. На предел выносливости КМ влияют различные факторы: вид нагружения, концентрация напряжений, масштабный фактор, температура испытаний и явление разогрева вследствие больших гистерезисных потерь и слабой теплопроводности КМ, анизотропия, частота нагружения и др. /6,39,48/.

Особенности структуры и специфика свойств композитных материалов предопределяют многообразие и сложность механизма и характера усталостных разрушений. При этом ответственными могут быть как тангенциальные σ_{ij} ($j=1,2,6$), так и поперечные нормальные и касательные σ_{33} , σ_{22} ($\rho=4,5$) напряжения. Поэтому необходимо знать пределы выносливости при различных видах напряженно-деформированного состояния и соотношениях его компонентов. Прямое экспериментальное исследование выносливости КМ ввиду обилия структур армирования и схем нагружения является весьма трудоемким, так как предусматривает массовый эксперимент и в настоящее время не представляется возможным. Наиболее реальный подход предусматривает проведение только основных экспериментов при достаточно простых схемах динамического нагружения, регламентируемых данным критерием выносливости.

При разработке методов усталостных испытаний выбор той или иной совокупности схем нагружения зависит от принятого феноменологического критерия выносливости. Пусть поверхность выносливости описывается в шестимерном пространстве динамических напряжений тензором четвертого ранга /48/.

$$\Pi_{\alpha\beta\gamma\delta} \sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\gamma\delta} = 1. \quad (5.32)$$

Тогда для ортотропного тела в главных осях упругой симметрии можно записать (в матричных обозначениях):

$$\Pi_{11} \sigma_{11}^2 + \Pi_{22} \sigma_{22}^2 + \Pi_{33} \sigma_{33}^2 + 4(\Pi_{44} \sigma_{44}^2 + \Pi_{55} \sigma_{55}^2 + \Pi_{66} \sigma_{66}^2) + 2(\Pi_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} + \Pi_{13} \sigma_{11} \sigma_{33} + \Pi_{23} \sigma_{22} \sigma_{33}) = 1. \quad (5.33)$$

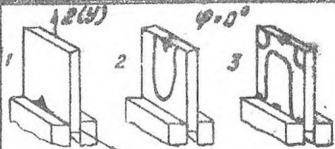
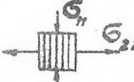
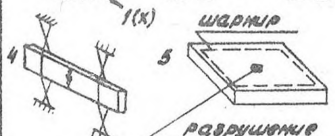
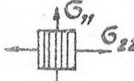
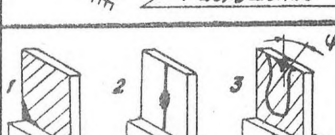
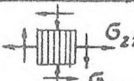
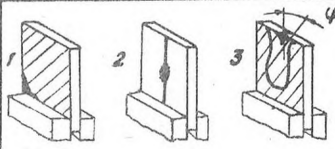
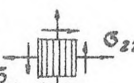
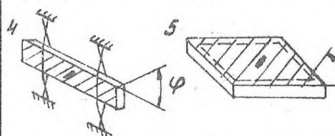
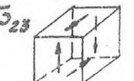
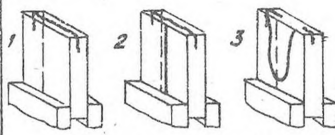
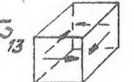
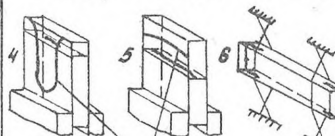
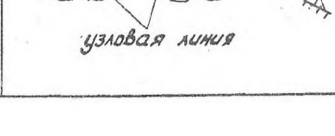
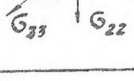
Если уровень действующих напряжений соответствует точке вне пространства, описываемого данным критерием, то через определенное число циклов (равное базе испытаний при определении $P_{\text{аэдо}} \equiv P_{ij}$) возможно разрушение. Из (5.33) видно, что для определения усталостных свойств КМ при различных НДС необходимо знать девять составляющих тензора поверхности выносливости $P_{\text{аэдо}}$ при определенных схемах "чистого" нагружения. Положим, например, $\sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_{44} = \sigma_{55} = \sigma_{66} = 0$; $\sigma_{ii} = \sigma_{ii}^0$ (σ_{ii}^0 — предел выносливости при одноосном циклическом нагружении в направлении оси симметрии I), тогда из формулы (5.33) получим, что $P_{ii}(\sigma_{ii}^0)^2 = 1$ или $P_{ii} = (\sigma_{ii}^0)^{-2}$. Обеспечить "чистое" циклическое нагружение принципиально трудно. Причем не всегда удастся получить НДС с заданной степенью "чистоты" и тем более оценить влияние помех на исследуемую характеристику. Поэтому такие компоненты выносливости целесообразно находить путем решения относительно них линейной системы уравнений, составленной из (5.33) по результатам "неочищенных" испытаний, но включающих все необходимые напряжения и их комбинации. Единственность решения системы вытекает из основных требований, предъявляемых к феноменологическим критериям.

Большие возможности для организации необходимых видов высокочастотного нагружения и типов разрушения при достаточной экономичности имеют резонансные методы, суть которых — определение выносливости на образцах, совершающих резонансные колебания.

Необходимая совокупность методов испытаний представлена в табл. 5.5. Обоснованием методов послужили результаты исследования НДС при свободных колебаниях. Так, например, для определения поперечных компонентов P_{pp} и P_{iz} обязательным является реализация разрушений во внутренних слоях, в том числе в плоскостях $\bar{z} = 0$ однородного или $Z = \lambda_z$ неоднородного пакетов. Это требуется для определения P_{iz} . Использование неоднородного по толщине пакета, для которого можно обеспечить $\lambda_i \neq \lambda_z$, позволяет определить P_{iz} и при разрушении в плоскости действия σ_{pp}^{max} . Следует отметить, что при консольном закреплении заземленная часть образца должна иметь достаточную площадь, а кромки тисков (прокладок) следует скруглить, чтобы исключить смятие образца и перерезание волокон. Такие мероприятия позволяют получить усталостную прочность несколько выше, чем при испытаниях с разрушением на свободной кромке, где может сказываться краевой эффект. За критерий усталостного разрушения обычно принимают снижение на 3...5% резонансной частоты. Однако при некоторых его видах возможно незначительное падение частоты, но наблюдается появление

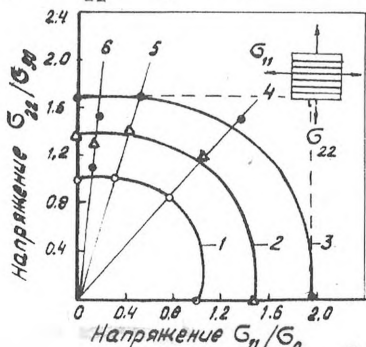
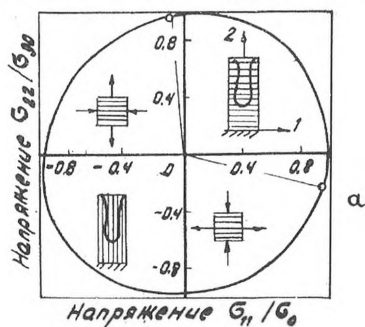
Таблица 5.5

Определение компонентов критериев прочности
при резонансных испытаниях композитов

№ групп	Π_{ijke}	Вид НДС	Схема реализации	Примечание
I	Π_{IIII}			ОСТ I 90214-75 $\varphi = 0^0, 90^0$
	Π_{2222}			ОСТ I 90276-78 $\varphi = 0^0, 90^0$
	Π_{II22}			
2	Π_{I2I2}			$\varphi = 0^0, 90^0$ $\varphi = 0^0, 90^0$
	Π_{I2I2}			$\varphi = 0^0, 90^0$
3	Π_{2323}			$\varphi = 0^0, 90^0$
	Π_{I3I3}			$\varphi = 0^0, 90^0$
	Π_{3333}			$\varphi = 0^0, 90^0$
	Π_{II33}			$\varphi = 0^0, 90^0$
	Π_{2233}			$\varphi = 0^0, 90^0$

изменений в НДС и рост декремента колебаний. Поэтому рекомендуется пользоваться обобщенным критерием, учитывающим и эти параметры.

При выборе феноменологического критерия выносливости естественным является использование достижений в области теорий статической прочности. В случае замены статических характеристик (пределов прочности) на соответствующие динамические (пределы выносливости) эти критерии могут при определенных условиях применяться и для оценки выносливости. Пределами применимости того или иного критерия являются особенности КМ (степень анизотропии свойств, тип матрицы и др.) и характер НДС (знаки компонентов напряжения). Так, при степени анизотропии 20...30 при сложном НДС применимы критерии максимальных напряжений, Малмейстера, Мизеса-Хилла и энергетический. При умеренной анизотропии (до 5...7) применим также и критерий Ашкенази. Следует отметить, что иногда может возникнуть необходимость в описании выносливости при различных знаках напряжений разными критериями. Некоторые результаты исследования, выполненные с применением пневмовозбудителя, представлены на рис. 5.7 /48/. Установлено, что учет σ_{22} при испытаниях по



Р и с.5.7. Оценка ограниченных пределов выносливости на основе энергетического критерия прочности(а) и предельные кривые равноопасных напряженных состояний при $\sigma_{12}=0$, построенные по критерию выносливости в форме критерия Мизеса-Хилла (б): б - $N_u=10^7(1); 10^6(2); 10^5(3); \sigma_{11}/\sigma_{22}=3,535(4); 1,267(5); 0,4776(6) \cdot \sigma_{90}=28,62 \text{ МПа}, \sigma_0=117,52 \text{ МПа} (N_u=10^7)$; — — — предельная кривая, построенная по критерию максимальных напряжений

ОСТ-I-902I4-75 позволил повысить точность для ЭТФ-ВМ на 3,6...5,2% (см.рис.5.7,а). Критерий Мизеса-Хилла удовлетворительно описывает выносливость бороалюминия (см.рис.5.7,б).

5.5.1. Вибропрочность материала

Тензорно-полиномиальный критерий прочности четвертой степени (критерий Ашкенази) позволяет получить закономерности изменения предельного напряжения (в нашем случае предела выносливости) в зависимости от ориентации усилия в анизотропном материале. При однокомпонентном нагружении ортотропного образца с углом армирования φ они имеют вид [9]

$$\begin{aligned} \sigma_{11}' &= \sigma_{11}^0 (C^4 + \bar{b}_6 \tilde{S}^2 + C_6 S^4)^{-1}; \quad \sigma_{22}' = \sigma_{11}^0 (S^4 + \bar{b}_6 \tilde{S}^2 + C_6 C^4); \quad \sigma_{33}' = \sigma_{33}^0; \\ \sigma_{66}' &= \sigma_{66}^0 (\tilde{C}^2 + \bar{n}_T \tilde{S}^2); \quad \sigma_{44}' = \sigma_{44}^0 (C^2 + \bar{n}_T S^2); \quad \sigma_{55}' = \sigma_{55}^0 (C^2 + \bar{n}_T^{-1} S^2), \end{aligned} \quad (5.34)$$

где $C_6 = \sigma_{11}^0 / \sigma_{11}^{90} = \sigma_{11}^0 / \sigma_{22}^0$; $\bar{b}_6 = \sigma_{11}^0 (\sigma_{11}^{45})^{-1} (1 + C_6) / 4$;
 $\bar{n}_T = \sigma_{66}^0 / \sigma_{66}^{45}$; $\bar{n}_T = \sigma_{44}^0 / \sigma_{55}^0$; $\sigma_{11}^0, \sigma_{22}^0, \sigma_{33}^0$ —

пределы выносливости при циклическом растяжении (сжатии) в направлении осей симметрии ($\varphi = 0^\circ$) 1, 2, 3 соответственно; $\sigma_{44}^0, \sigma_{55}^0, \sigma_{66}^0$ — пределы выносливости при циклическом сдвиге ($\varphi = 0^\circ$) в плоскостях 23, 13, 12 соответственно; $\sigma_{11}^{45}, \sigma_{66}^{45}$ — пределы выносливости при растяжении (сжатии) в I-м направлении и сдвиге в плоскости I2 образца, армированного под углом 45° ; $C = \cos \varphi$; $S = \sin \varphi$; $\tilde{C} = \cos 2\varphi$; $\tilde{S} = \sin 2\varphi$. Коэффициент запаса выносливости по аналогии с коэффициентом запаса прочности можно определить по формуле

$$K = \sigma_{-1} / \sigma_{\text{экв}} \quad (5.35)$$

где σ_{-1} — предел выносливости материала (конструкции); $\sigma_{\text{экв}}$ — наибольшее динамическое эквивалентное напряжение, установленное на основе применяемого критерия выносливости.

Действующее в материале (конструкции) динамическое напряжение зависит от уровня динамической нагрузки P и диссипативных свойств (δ):

$$\sigma_{\text{экв}} \sim P / \delta. \quad (5.36)$$

С учетом выражения (5.36) коэффициент запаса (5.35)

$$K \sim \sigma_{-1} \delta / P. \quad (5.37)$$

Параметр $\sigma_{-1} \delta$ известен под названием вибропрочность. Он пропорционален коэффициенту запаса. Используя соотношения (5.18) и (5.34), получим выражения для вибропрочности при чистых схемах нагружения: растяжение (сжатие) (K_i), тангенциальный (K_ϕ) и поперечный (K_ρ) сдвиг и нормальное обжатие (K_β).

$$K_1 = \sigma_{11}^0 \sigma_{11}^0 \frac{C^4 + \bar{b}_6 \tilde{S}^2 + C_6 S^4}{C^4 + \bar{b}_6 \tilde{S}^2 + C_6 S^4} r_1; \quad K_2 = \sigma_{11}^0 \sigma_{11}^0 \frac{S^4 + \bar{b}_6 \tilde{S}^2 + C_6 C^4}{S^4 + \bar{b}_6 \tilde{S}^2 + C_6 C^4} r_2;$$

$$K_4 = \sigma_{44}^0 \sigma_{44}^{90} \frac{C^2 + dS^2}{C^2 + \bar{n}_T S^2} r_4; \quad K_5 = \sigma_{55}^0 \sigma_{55}^{45} \frac{C^2 + d^{-1}S^2}{C^2 + \bar{n}_T^{-1} S^2} r_5; \\ K_3 = \sigma_{33}^0 \sigma_{33}^0 r_3; \quad K_6 = \sigma_{66}^0 \sigma_{11}^{90} \frac{0,25(1+C_0)\tilde{S}^2 + \delta_8 \tilde{C}^2}{\tilde{C}^2 + \bar{n}_T \tilde{S}^2} r_6, \quad (5.38)$$

где $C_0 = \sigma_{11}^{90}/\sigma_{11}^0 = \sigma_2/\sigma_1$; $\delta_8 = \sigma_{11}^{45}/\sigma_{11}^0 - (1+C_0)/4$; $d = \sigma_{55}^0/\sigma_{44}^0$;
 $r_1 = 1 + \mu_{12}^2(\varphi) + \mu_{13}^2(\varphi) + \nu_{1,12}^2(\varphi)$; $r_2 = 1 + \mu_{21}^2(\varphi) + \mu_{23}^2(\varphi) + \nu_{2,12}^2(\varphi)$;
 $r_3 = 1 + \mu_{31}^2(\varphi) + \mu_{32}^2(\varphi) + \nu_{3,12}^2(\varphi)$; $r_4 = 1 + \nu_{44,55}^2(\varphi)$; $r_5 = 1 + \nu_{55,44}^2(\varphi)$;
 $r_6 = 1 + \nu_{12,1}^2(\varphi) + \nu_{12,2}^2(\varphi) + \nu_{12,3}^2(\varphi)$; $\sigma_{11}^{\varphi} = \sigma_1^{\varphi}/r_1(\varphi)$.

Для определения вибропрочности при чистых схемах нагружения ортотропного материала с углом армирования φ необходимы экспериментальные значения шести технических постоянных диссипации $\sigma_1^0, \sigma_1^{45}, \sigma_1^{90}, \sigma_2^0, \sigma_3^0, \sigma_6^0$, шести пределов выносливости $\sigma_{11}^0 = \sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_{33}, \sigma_{44}, \sigma_{55}^0$ и девяти упругих постоянных. Если σ_1^{φ} и σ_{11}^{φ} определяют при резонансных колебаниях свободно подвешенных на струнах стержней, то K_1 характеризует вибропрочность в условиях, близких к чистому изгибу /39/.

5.5.2. Вибропрочность и оптимальное армирование конструкций

Если для конструкции из КМ применим критерий максимальных напряжений, то ее вибропрочность можно оценить по формуле (5.38). При этом будет дана несколько завышенная оценка. Критерий максимальных напряжений может быть применен к оценке выносливости относительно длинных пластин, панелей и лопаток турбомашин при их колебаниях по изгибным (m_0), первой крутильной (II) и первой пластинчатой (I2) формам. В случае, когда разрушение при колебаниях по m_0 -й, II-й, I2-й формам возникают соответственно от σ_{11} , σ_{66} и σ_{22} , будем иметь $K_{m_0} = K_1$, $K_{II} = K_6$, $K_{I2} = K_2$.

Для конструкций, находящихся в условиях сложного динамического НДС, необходимо применять критерии выносливости (вибропрочности), учитывающие все составляющие НДС в зоне разрушения. В качестве примера определим вибропрочность тонкой ортотропной ($\pm \varphi$) шарнирно опертой пластины при резонансных колебаниях по m_0 -й форме на основе критериев Мизеса-Хилла и Ашкенази. При таких условиях, в соответствии с ОСТ I 90276-78, разрушение будет наблюдаться в центре пластины, где реализуется плоское (σ_x, σ_y) циклическое напряженное состояние с амплитудой напряжений

$$\sigma_x = q_0 a^2 H^{-2} \Phi; \quad \sigma_y = \sigma_y \sigma_x, \quad (5.39)$$

где q_0 - интенсивность распределенной (инерционной) нагрузки

$$\varphi = \frac{m^2 + \mu_{21} n^2 c^2}{m^4 + 2c^2 m^2 n^2 \bar{D}_3 + n^4 c^4 \bar{D}_2}; \quad \bar{\sigma}_y = \frac{E_2(n^2 c^2 + \mu_{12} m^2)}{E_1(n^2 c^2 \mu_{21} + m^2)};$$

$$\bar{D}_2 = E_2 E_1^{-1}; \quad \bar{D}_3 = \mu_{21} + 2(1 - \mu_{12} \mu_{21}) \epsilon_{12} E_1^{-1} \approx \mu_{21} + 2 \epsilon_{12} E_1^{-1}; \quad c = \alpha \beta^{-1}.$$

Предел выносливости КМ при таком напряженном состоянии можно представить в виде

$$\sigma_{-1}^* = \sigma_0 F \varphi^{-1}. \quad (5.40)$$

При условии, что коэффициенты запаса прочности одинаковы для разных направлений в материале, а прочность КМ при одинаковых углах φ не зависит от вида армирования (φ или $\pm \varphi$), функция F , исходя из критериев Ашкенази (F_A) и Мизеса-Хилла (F_{M-x}), будет равна

$$F_A = \frac{[a_1(S^4 + C^4) + a_2 S^2 C^2]^{0.5}}{\delta_1 C^4 + \delta_2 S^4 + \delta_3 S^2 C^2}; \quad F_{M-x} = (\delta_1 C^4 + \delta_2 S^4 + \delta_3 S^2 C^2)^{-0.5} \quad (5.41)$$

Здесь $a_1 = 1 + \bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_y^2$; $a_2 = 1 + 4\bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_y^2$; $\delta_1 = 1 + C \bar{\sigma}_y^2 + 4\delta_6 \bar{\sigma}_y$;
 $\delta_2 = C \bar{\sigma}_y^2 + 4\delta_6 \bar{\sigma}_y$; $\delta_3 = (1 + C) 2\bar{\sigma}_y + 4\delta_6 (1 + \bar{\sigma}_y^2)$; $C = \cos \varphi$; $S = \sin \varphi$.

Вибропрочность шарнирно опертой пластины определяется по формуле

$$K^* = \sigma_{-1}^* \sigma^* \quad \text{или} \quad K^* = \sigma_0 F \varphi^{-1} \sigma^*, \quad (5.42)$$

где σ^* вычисляется по формуле (5.27).

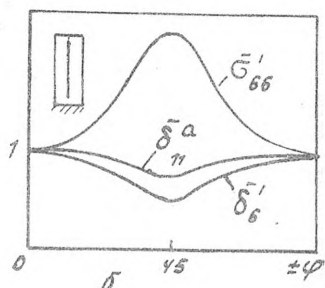
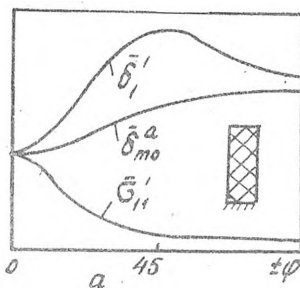
Будем считать оптимальной структурой армирования структуру, обеспечивающую максимум вибропрочности. При определении вибропрочности элементов конструкций ГТД из КМ следует учитывать суммарное демпфирование от диссипации энергии в материале (σ) и покрытия (σ^a), аэродинамическое (σ^a) и конструктивное (σ_K) демпфирование. Первые три составляющие, как было показано, зависят от структуры материала и размеров конструкции. То есть критерием оптимальности для консольных пластин и лопаток ГТД является

$$K_{mo} = \sigma_{11}' (\sigma_1' + \sigma_{mo}^a + \sigma_{mo}^n) = \max; \quad K_{11} = \sigma_{66}' (\sigma_6' + \sigma_{11}^a + \sigma_{11}^n) = \max; \\ K_{12} = \sigma_{22}' (\sigma_2' + \sigma_{12}^a + \sigma_{12}^n) = \max, \quad (5.43)$$

для шарнирно опертых пластин

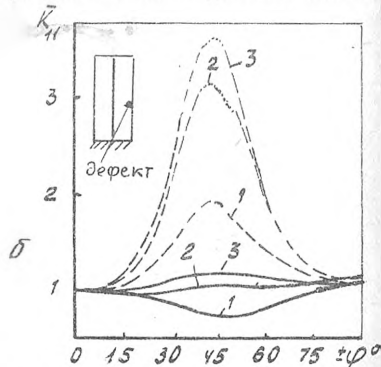
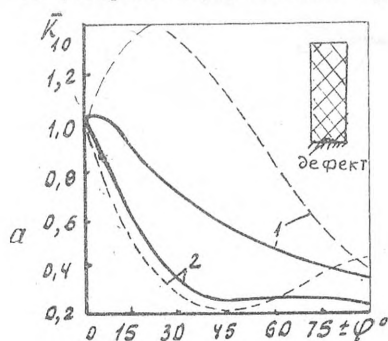
$$K^* = \max \quad \text{или} \quad F \varphi^{-1} \sigma^* = \max. \quad (5.44)$$

Параметрами управления являются угол армирования, степень неоднородности материала и относительные размеры конструкции. Анализ результатов исследования показал следующее. Угол армирования качественно оказывает примерно противоположное влияние на выносливость и демпфирующие свойства элементов из КМ (рис. 5.8). Зависимости моду-



Р и с. 5.8. Качественное влияние угла армирования на выносливость, демпфирование КМ и аэродемпфирование: а – изгибные; б – крутильные колебания

лей упругости и соответствующих пределов выносливости от угла армирования качественно совпадают (сравнить рис. 1.2, б и 5.8). Для тонких и длинных лопаток при колебаниях по нижшим изгибным формам, когда аэродемпфирование превалирует над рассеянием энергии в материале ($\delta_{10}^a \gg \delta_1^a$), оптимальный угол армирования $\varphi_{opt}^{10} = 0^\circ$ (рис. 5.9, а, кривые 2). С ростом толщины лопатки, номера формы колебаний (n) и с уменьшением ее длины, т.е. с ростом ее собственной частоты колебаний аэродемпфирование существенно снижается и φ_{opt}^{n0} в зависимости от материала возрастает до $\pm(7 \dots 22^\circ)$ (см. рис. 5.9, а, кривые 1). Для лопаток из КМ $n_T > n_\phi$ при крутильной форме колебаний с достаточно высокой резонансной частотой, когда δ_{11}^a можно пренебречь, $\varphi_{opt}^{11} = 0, 90^\circ$ (см. рис. 5.9, б, сплошная кривая 1). Если $\delta_{11}^a > \delta_6^a$, то $\varphi_{opt}^{11} = \pm 45, 90^\circ$ (см. рис. 5.9, б, сплошная кривая 2). Для тонких и длинных лопаток



Р и с. 5.9. Зависимость относительной вибропрочности элементов из КМ при изгибных (а) и крутильных (б) колебаниях от угла армирования: а – КМУ-ЛЛ ---, ЭФ-ВМІ —; б – ЭФ-ВМІ; $n_T = 0,2$ ---; $0,6$ —

$\delta_{11}'' \gg \delta_{\delta}''$, а также при $n_{\tau} < n_{\delta}$ оптимальный угол армирования равен $\pm 45^{\circ}$ (см. рис. 5.9, б, 3-я сплошная и пунктирные кривые). Если $n_{\tau} = n_{\delta}$, то при $\delta_{11}'' \approx 0$ угол армирования не влияет на вибропрочность и $\bar{K}_{11} = 1$, а при $\delta_{11}'' \neq 0$ $\varphi_{opt}'' = 90^{\circ}$. С ростом номера крутильных форм m возрастает роль деформаций изгиба и оптимальная структура армирования смещается в область оптимума по изгибным формам. При пластинчатой форме колебаний $\varphi_{opt}'' = \pi/2 - \varphi_{opt}^{10}$.

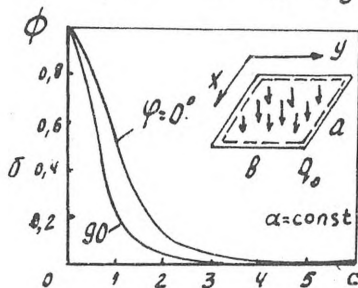
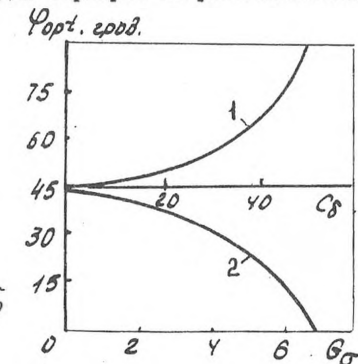
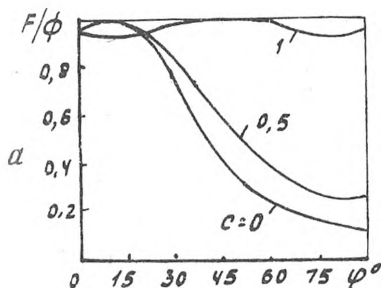
Таким образом, оптимальный по вибропрочности угол армирования зависит от соотношения анизотропии выносливости и диссипативных свойств и может принимать различные значения (рис. 5.10).

С увеличением удлинения шарнирно опертой пластины C при постоянной интенсивности q_0 значение безразмерного напряжения φ падает. Максимум безразмерной выносливости при плоском напряженном состоянии $F\varphi^{-1}$ достигается при различных значениях φ (рис. 5.11, а, б).

Если оптимум по демпфированию для шарнирно опертой пластины не зависит от C и равен $\varphi_{opt}(\delta^* = max) = \pm 45^{\circ}$, то оптимальный по выносливости и вибропрочности угол арми-

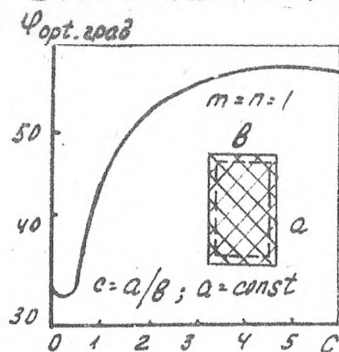
Р и с. 5.10. Влияние степени анизотропии выносливости и диссипативных свойств гипотетического КМ при изгибных колебаниях элемента на оптимальный угол армирования:

1 - $\sigma_0/\sigma_{45} = 1$; $\delta_{\delta} = 25$; 2 - $C_{\delta} = 2$; $\delta_{45}/\delta_0 = 5$; $C_{\delta} = \delta_{90}/\delta_0$



Р и с. 5.11. Влияние угла армирования на безразмерную выносливость (а) и относительное напряжение (б) при плоском циклическом напряженном состоянии пластины из ЭГФ-ВМІ ($m = n = 1$)

вания зависит от удлинения пластины. Оптимальный по выносливости угол армирования изменяется от 0 до 90° , причем достаточно интенсивно в весьма узком интервале φ . Оптимум по вибропрочности лежит, например для пластины из стеклопластика ЭФ-ВМІ, в интервале $\varphi_{opt} = \pm (33...57^\circ)$ (рис. 5.12).



Р и с. 5.12. Влияние удлинения шарнирно опертой пластины на оптимальное значение угла армирования при колебаниях по основной ($m=n=1$) форме оптимизации с последующей экспериментальной проверкой. Так как требования к проекту противоречивы, то рациональная структура является компромиссной структурой армирования. Полное решение данной проблемы — сложная задача и, в частности, из-за недостатка исходных данных. Здесь будут даны рекомендации по армированию слоистых элементов (лопаток, пластин, пологих панелей), разработанные на основе исследования их статической прочности и крутильной жесткости /53/, спектра собственных частот колебаний /2I/, напряженно-деформированного состояния при резонансных колебаниях и вибропрочности.

Обеспечение статической прочности и крутильной жесткости лопаток ГТД. Выбор рациональной схемы армирования рабочих лопаток турбомашин при статическом нагружении определяется в основном степенью анизотропии упругих и прочностных свойств КМ. При резком (до $\sim 50\%$) падении свойств материала на растяжении с увеличением угла армирования до 20° (угол между направлениями армирования и действующей центробежной силы или осью лопатки) армирующие слои необходимо располагать ближе к линии действия силы. Для менее анизотропного мате-

5.6. Рекомендации по рациональному армированию композитных конструкций

Рациональная структура армирования — структура армирования КМ (тип и соотношение компонентов, углы армирования и порядок расположения слоев), обеспечивающая необходимые статическую прочность и жесткость при действующих нагрузках, вибропрочность при возможных резонансных колебаниях и спектр собственных частот. Рациональность структуры (качество проекта) может быть достигнута путем многоцелевой

риала (уменьшение свойств при тех же условиях до $\sim 25\%$) 30...40% слоев целесообразно армировать под углом $\pm 30... \pm 45^\circ$ к оси лопатки. Такое армирование повышает крутильную жесткость пера.

Обеспечение жесткости и спектра собственных частот колебаний консольных и двусторонне заземленных элементов. При разработке структуры армирования на первом этапе необходимо стремиться к обеспечению максимально возможных эффективных жесткостей при растяжении, изгибе и кручении ($E\theta = \max$) и к соответствию ее действующим нагрузкам. Затем необходимо устранить появление возможных резонансов. При этом следует также исключить кратность собственных частот и обеспечить их необходимую раздвижку (150...200 Гц). В противном случае наблюдается повышенная связанность форм колебаний и расширяется зона возможных резонансных колебаний.

Прежде всего следует отметить, что наиболее жесткие слои, составляющие 60...70% от общей толщины и обеспечивающие 95...98% жесткости, должны располагаться снаружи пакета. Внутренние слои, занимающие 30...40% толщины, в формировании изгибной и крутильной жесткостей не участвуют. Они в большей степени влияют на жесткость поперечного сдвига. Поэтому их необходимо изготавливать из материала, хорошо работающего на поперечный сдвиг и (или) обладающего другими специальными свойствами (СС), например высоким демпфированием. С целью исключения изгибно-крутильной связанности и, как следствие, коробления структура должна обеспечивать самоуравновешенность материала.

Для обеспечения максимально возможного уровня частот изгибных форм независимо от удлинения пластины (панели) необходимо для наружных слоев (60...70%) применять высокомодульный материал типа углеборопластика с углом армирования 0° . Эта же структура является оптимальной и с точки зрения обеспечения максимума всех других частот коротких элементов ($C < 0,5$).

С ростом C обеспечить $f_{1n} = f_{1n}^{max}$ ($n = 1, 2$) можно путем армирования части наружных слоев под углом $\pm \varphi = 30...55^\circ$. Причем для умеренно длинных элементов ($C = 1,5...3,5$) рациональной является структура $(\pm \varphi \text{ У/У/СС/У/}\pm \varphi \text{ У})_T$. Здесь содержание разориентированных слоев равно 20...40%, а $\varphi = 30...37^\circ$. Больший угол армирования, снижая изгибную жесткость, не обеспечивает повышение крутильных частот. Если по каким-либо соображениям, например исходя из условия ударной прочности, применяется стеклогуглепластик, то оптималь-

ной будет структура $(OC/\pm 45C/\pm 30Y/OY/CC)_s$. Содержание C — 20%; Y — 50% ($20\dots 25\%\pm 30Y$); CC—30%.

При $C \geq 4\dots 5$ максимум f_{11} достигается структурой $(\pm 45Y)_T$ или $(\pm 45B)_T$, а f_{12} — $(90Y)_T$ или $(90B)_T$. Поэтому компромиссным решением является структура армирования $(\pm \varphi B/OY/CC/OY/\pm \varphi B)_T$. Угол армирования наружных слоев и их относительная толщина зависят от условий конкретной задачи. Для достижения, например, больших значений частот изгибных и крутильных форм несущие слои следует армировать под углом $\varphi = 20\dots 45^\circ$. Повышение частот пластиночных форм (особенно низших) можно достигнуть при $\varphi = 45\dots 75^\circ$. В этом случае более существенно снижаются изгибные частоты. В целом же рост толщины наружных слоев с углом $\pm \varphi$ способствует увеличению крутильных и пластиночных частот. Закрученность лопатки, повышая изгибно-крутильную связанность, приводит с увеличением угла армирования к менее существенному росту крутильной и падению изгибной частот колебаний. С уменьшением клиновидности лопатки относительное содержание управляющих (наружных) слоев возрастает к ее концевому сечению, что повышает эффективность управления частотами, особенно высших форм. Изогнутость профиля повышает не только жесткость изгиба вдоль оси лопатки, но и ее изгибно-изгибную связанность деформаций. Поэтому с повышением степени анизотропии материала $E_2 E_1$ эффект роста частот изгибных форм на лопатках проявляется в меньшей степени, чем на пластинах. Следует также иметь в виду, что увеличение закрутки приводит при изгибных колебаниях к росту эффектов от сдвига и инерции вращения.

Обеспечение вибропрочности элементов из КМ. Оптимальная по вибропрочности структура армирования при колебаниях по различным отдельным формам, влияние на нее аэродемпфирования приведены в разделе 5.5.1. Рациональная по вибропрочности структура должна обеспечивать вибропрочность конструкции одновременно при колебаниях по разным формам. Поэтому целесообразным было бы создание лопаток с переменным по поверхности слоя углом армирования. Закон изменения направления армирования при этом определяется геометрией лопатки и условиями ее закрепления. Следует также отметить, что в качестве оберточных (наружных) слоев нужно использовать тонкие высокопрочные и высокомодульные, но слабо анизотропные ткани либо стальную (титановую) фольгу. Последнее обеспечит и эрозионную стойкость. Материал наружных слоев должен иметь большие деформационные пределы выносливости на циклический изгиб и тангенциальный сдвиг. Для стеклоуглепластикового паке-

та при изгибных колебаниях наружные слои целесообразно армировать тонкой стеклотканью под углом 0^0 . Такое армирование снижает опасность разрушения от сдвига в плоскости слоя. Внутренние слои должны обладать достаточной вибропрочностью при поперечном сдвиге. Это достигается применением материала либо с большей выносливостью, либо с высокими диссипативными свойствами. Последнее достигается, например, заполнением конструкций вязким герметиком. Перспективные структуры армирования лопаток повышенной вибропрочности представлены на рис.5.13 и 5.14.

6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КМ

Технология изготовления деталей из КМ неразрывно связана с их конструированием и во многом определяет работоспособность готовых изделий. В процессе изготовления не только формируется деталь, но и конструируется материал с таким расчетом, чтобы наиболее полно реализовать в конструкции свойства входящих в него компонентов.

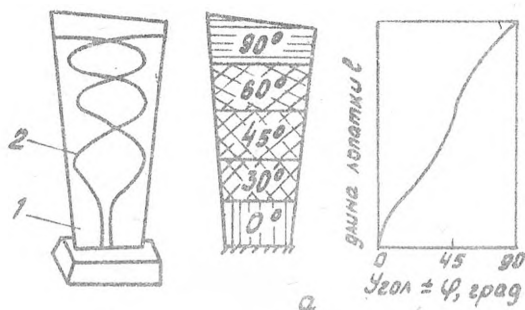
При разработке технологических процессов ставятся следующие основные задачи:

- 1) обеспечение качества подготовки исходных материалов;
- 2) получение заданной структуры армирования (соотношение наполнителей и связующего, направление укладки, местные усиления другими материалами и т.д.);
- 3) обеспечение режимов формования и отверждения, заданных разработчиками материалов;
- 4) создание необходимого оборудования и оснастки, обеспечивающих получение качественных изделий при невысокой трудоемкости изготовления.

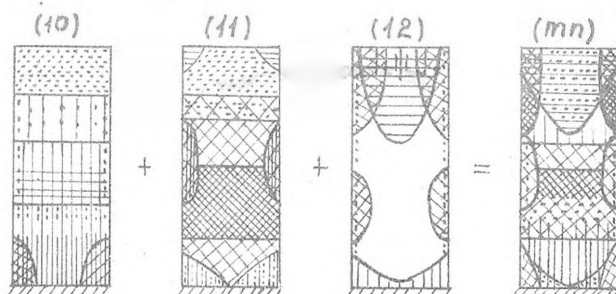
6.1. Способы изготовления деталей из полимерных композиционных материалов

Производство деталей из КМ может быть осуществлено различными способами. Выбор способа определяется конструкцией и габаритами деталей, их назначением и условиями работы, а также типом армирующего наполнителя и связующего.

Наиболее распространенными являются следующие способы изготовления деталей:



Р и с. 5.13. Лопатка повышенной вибропрочности (а), влияние удлинения и способа крепления на структуру ее армирования (б, в): а - 1 - перо; 2 - армирующий элемент

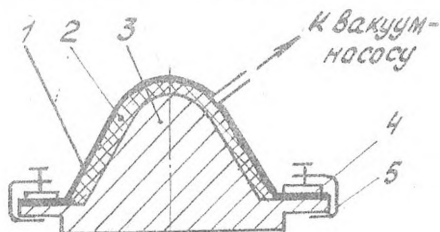


Р и с. 5.14. Рациональная по вибропрочности структура армирования лопатки из КМ (в скобках указан номер формы колебаний)

1. Прямое прессование. Формование осуществляется в пресс-формах. Форма детали определяется конфигурацией пуансона и матрицы. Способ обеспечивает однородную структуру и высокие физико-механические характеристики материала /54/. Прямое прессование применяется для изготовления лопаток вентилятора и компрессора, а также небольших деталей типа кожухов, крышек, фланцев и т.п.

2. Формование с помощью герметичной эластичной оболочки. Собранный пакет заготовок из предварительно пропитанного связующим наполнителя (препрега) укладывается в специальную форму, рабочая поверхность которой покрыта разделительной антиадгезионной пленкой. Пакет закрывается эластичным (обычно резиновым) чехлом и герметизируется прижимными кольцами и винтовыми зажимами. Далее производится отверждение связующего при заданном термическом режиме и избыточном давлении. Давление может создаваться путем вакуумирования (рис.6.1) в пресс-камерах (рис.6.2), в автоклавах и гидроклавах (рис.6.3). Плотность материала деталей тем выше, чем выше избыточное давление.

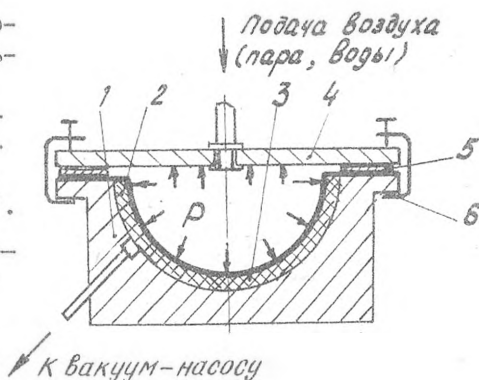
Р и с. 6.1. Схема формования вакуумированием: 1-эластичный чехол; 2-формируемая деталь; 3-форма; 4-прижимное кольцо; 5-винтовые зажимы

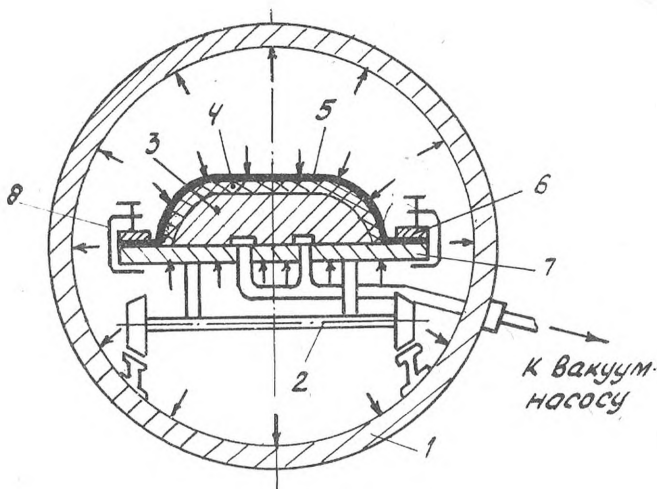


Наиболее высокое давление (до 15 МПа) можно получить в гидроклаве. Способ требует минимальных затрат на оснастку.

3. Намотка. С помощью этого способа можно получать оболочки вращения в большом диапазоне форм и размеров /55-60/.

Р и с. 6.2. Схема формования в пресс-камерах: 1-форма; 2-эластичный чехол; 3- формируемая деталь; 4-крышка; 5-прокладка; 6-винтовые зажимы





Р и с. 6.3. Схема формирования в автоклавах: 1-автоклав; 2-тележка; 3-форма; 4-формованная деталь; 5-эластичный чехол; 6-прижимное кольцо; 7-плита основания; 8-винтовые зажимы

Способ намотки применяется также для поверхностного армирования металлических корпусов и оболочек с целью повышения жесткости, непробиваемости и вибродемпфирования. Разновидностями способа являются тканевая, продольно-поперечная и спиральная намотки. В практике изготовления оболочек ГТД может быть применено сочетание перечисленных видов намотки, что позволяет наиболее полно использовать преимущества каждого из них. Применение способа намотки ограничено трудностями получения оболочек сложного профиля.

4. Пропитка под вакуумом и давлением. Сущность способа заключается в том, что армирующий наполнитель в сухом виде закладывается в точно изготовленную и хорошо герметизированную пресс-форму, после чего вакуум-насосом в пресс-форме создается разрежение и под действием дополнительного избыточного давления в полость пресс-формы нагнетается жидкое связующее, которое пропитывает уложенный там сухой наполнитель.

Основные преимущества этого способа:

обеспечение высоких и стабильных физико-механических характеристик материала благодаря удалению воздуха вакуумированием полости пресс-формы;

возможность получения высокой точности обводов и стенок у оболочек сложной формы;

исключение вредного воздействия на окружающих, достигаемое с помощью замкнутой системы пропитки.

6.2. Подготовка исходных материалов

Исходные материалы (связующее и наполнители) поступают в производство после контрольных испытаний на соответствие физико-механических и технологических свойств существующим техническим условиям и стандартам.

Подготовка связующих заключается в отвешивании расчетного количества компонентов (смола, растворителей, катализаторов), смешении их и в экстренном анализе связующих на вязкость и плотность. Проводятся эти операции согласно действующей на данный материал документации.

Пропитка наполнителей связующим в зависимости от способа изготовления и вида наполнителя производится либо непосредственно в процессе изготовления деталей (мокрый способ формования), либо предварительно на отдельной технологической операции (сухой способ формования). Предварительно пропитанный и подсушенный до эластичного состояния наполнитель (так называемый препрег) позволяет осуществлять более равномерное распределение связующего по толщине детали.

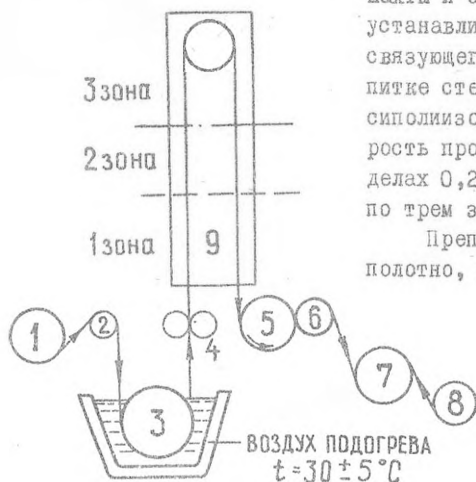
Мокрый способ формования предусматривает нанесение связующего либо пропусканием армирующего наполнителя через ванну со связующим непосредственно перед формованием, либо нагнетанием (засасыванием) связующего в пресс-форму. Способ более прост с точки зрения необходимого оборудования.

Схема пропиточной машины для получения препрегов из стеклоткани представлена на рис. 6.4. Сматываемая с вала I стеклоткань пропитывается связующим в подогретой до 30...40°C ванне 3, проходит через отжимные валики 4, которые удаляют излишки связующего, и попадает в сушильную шахту 9, где происходит удаление летучих веществ (спирта, ацетона). Просушенная ткань остывает и поступает на приемный барабан 7. Чтобы препрег не слипался, между слоями прокладывается поли-

этиленовая пленка, сматываемая с барабана 8. Привод 5 позволяет регулировать скорость движения ткани. Температура по зонам сушильной шахты и скорость движения стеклоткани устанавливаются в зависимости от марки связующего и наполнителя. Так, при пропитке стеклоткани марки Т-Ю-80 эпоксиполиизоцианатным связующим ЭП-І скорость пропитки регламентирована в пределах 0,2...0,27 м/мин, а температура по трем зонам равна 60, 80 и 90°C.

Препрег представляет собой липкое полотно, из которого можно получить довольно сложные изделия.

Препрег рекомендуется хранить в запаянных полиэтиленовых мешках при пониженной температуре (5...8°C). Это позволяет избежать контакта с влагой воздуха, вызывающего реакции взаимодействия. Герметично запаянный препрег сохраняет способность к переработке в течение 20 и более суток.



Р и с. 6.4. Схема пропиточной машины

Запаянный препрег сохраняет способность к переработке в течение 20 и более суток.

Рассмотрим применение различных способов на примерах изготовления некоторых деталей ГТД.

6.3. Изготовление лопаток компрессора прямым прессованием

Для изготовления рабочих и направляющих лопаток наиболее применяемым является трехкомпонентный полимерный КМ – стеклоуглепластик, в котором в качестве армирующего наполнителя используется углеродная лента и стеклоткань с высокомодульным волокном. Для конкретных условий работы соотношение между компонентами по перу лопатки выбирается расчетным и экспериментальным путем, т.е. материал конструируется исходя из действующих нагрузок.

Основными операциями в технологическом процессе изготовления лопаток являются:

- подготовка исходных материалов, получение препрега;
- раскрой препрега на заготовки;

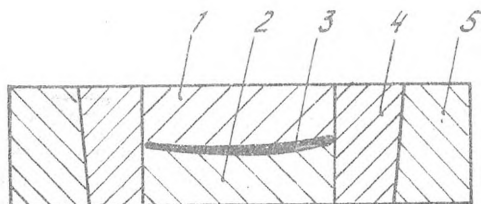
укладка заготовок и таблетирование пакета;
прессование и полимеризация;
нанесение эрозионно стойкого покрытия;
механическая обработка;
контроль качества.

Пропитка углеродных лент и стеклоткани ведется на пропиточной машине, типовая схема которой показана на рис. 6.4. Полученный препрег контролируется на содержание смолы и летучих веществ.

Формы раскроя заготовок определяются графоаналитическим построением профилей по сечениям пера лопатки. Пакет заготовок собирается в зависимости от конструкции лопатки и принятой схемы укладки (см. разд. 3). Например, вырезанные по шаблонам отдельные слои укладываются в заданном порядке в пакет, поверх которого наматываются оберточные слои из цельнокроеной заготовки.

При укладке предусматривается послойное чередование углеродной ленты и стеклоткани и обеспечение заданной ориентации волокон по принятой схеме армирования.

Прессование лопаток производится в пресс-формах закрытого типа (рис. 6.5) на гидравлических прессах с нагревательными устройствами



Р и с. 6.5. Пресс-форма для изготовления лопаток: 1-пуансон; 2-матрица; 3-формируемая лопатка; 4 - вставка; 5 - корпус

и с вакуумированием рабочей зоны. Температурный режим формования и последующей полимеризации регламентируется технической документацией на связующее.

В связи с низкой стойкостью армированных пластмасс и особенно углепластиков к пылевой и дождевой эрозии для повышения эрозионной стойкости лопаток применяются специальные покрытия. Наиболее эффек-

тивными из них являются: комбинированное электрохимическое покрытие из никеля и карбида титана, напрессованное на стеклоуглепластик через подслой из никелевой сетки; эластомерное покрытие, например, в виде пленочного клея на каучуковой основе, наносимое на поверхность пера перед прессованием. Эрозионная стойкость лопаток с покрытием находится на уровне стойкости титановых сплавов.

Механическая обработка лопаток включает в себя в основном фрезерование и шлифовку металлических деталей, соединенных с пером (замков, полок).

Контроль качества состоит из следующих этапов:

проверка геометрических размеров приборами, применяемыми для металлических лопаток;

оценка качества/структуры материала и наличия начальных дефектов в материале.

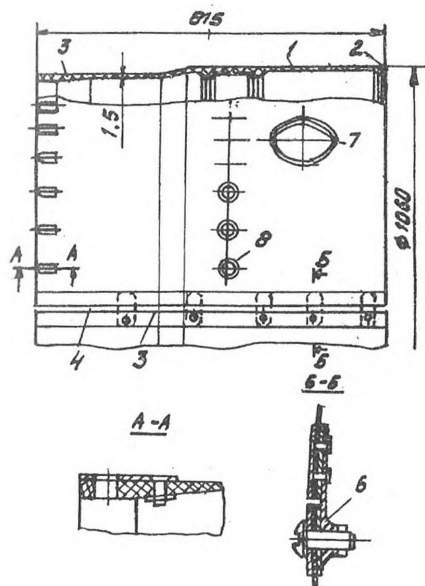
Для этой цели применяется определение собственных частот колебаний лопаток (изменение частоты по сравнению с эталоном свидетельствует о наличии дефектов). Оценку работоспособности деталей по комплексу параметров можно произвести также путем применения импульсного, ультразвукового, инфракрасного, оптического, микрорадиоволнового и некоторых других методов неразрушающего контроля.

6.4. Изготовление оболочек намоткой

В качестве примера рассмотрим изготовление стеклопластиковой оболочки, устанавливаемой над стартом компрессора. Конструкция оболочки представлена на рис. 6.6. Оболочка I имеет три окружных ребра жесткости 2 и фланец 3 для крепления на двигателе. Из условий сборки предусмотрен продольный разъем 4, вдоль которого приклепаны окантовки 5 из листового титанового сплава и анкерные гайки 6 для соединения половин оболочки между собой. В оболочке выполнены окна 7 для прохода радиальных элементов конструкции. В средней части оболочки имеется окружной ряд отверстий 8 для выхода воздуха, перепускаемого из компрессора. Кромки отверстий подкреплены штампованными титановыми окантовками.

Для изготовления оболочек подобного типа применен стеклопластик ЭПС-I.

Намотка производится на алюминиевую оправку, форма которой воспроизводит внутренние обводы оболочки. Перед намоткой оправку промывают в бензине и протирают спиртоацетоновой смесью, после чего



Р и с. 6.6. Конструкция оболочки

стеклолентой (операция называется викелевкой). Для выхода газов и избытка связующего фторопластовая пленка прокалывается зубчатым валиком. После намотки оправка с намотанной на нее оболочкой устанавливается в печь, где проходит полимеризация стеклопластика ЭПС-I по ступенчатому режиму: нагрев до 130°C , выдержка 2 ч 30 мин; нагрев до 180°C , выдержка 2 ч 15 мин, нагрев до 200°C , выдержка 2 ч 45 мин, охлаждение с печью до 50°C . После снятия викелевочного слоя производится очистка оболочки от наплывов и заусенцев, а затем механическая обработка – разрезка, вскрытие окон, приклепка металлических окантовок.

6.5. Изготовление деталей пропиткой под вакуумом и давлением

Применение способа пропитки под вакуумом и давлением наиболее целесообразно для получения корпусных деталей сложной формы: статорных колец вентилятора, корпусов антенных обтекателей и т.п.

на ее рабочую поверхность наносится антиадгезионный слой, в качестве которого могут быть использованы: раствор сырой резины в бензине; фторопластовая пленка; кремнийорганическая смазка. Лучшим разделительным слоем признана кремнийорганическая смазка с последующей ее термообработкой при температуре 220°C в течение двух часов.

Намотка производится на намоточном станке, оборудованном шпулярником, пропиточной ванной и регулируемым механизмом натяжения стеклонитей. Количество и соотношение слоев стеклоткани и стеклонитей, направление укладки задаются чертежом. После намотки наружная поверхность оболочки изолируется фторопластовой пленкой и сухой

Схема пропитки показана на рис. 6.7.

При проектировании пресс-формы, рабочая полость которой определяет форму и размеры изготавливаемой детали, должны быть обеспечены следующие требования:

1) назначение размеров рабочей полости с учетом коэффициентов линейного расширения формуемого материала и материала пресс-формы и коэффициента усадки;

2) достаточная жесткость пресс-формы;

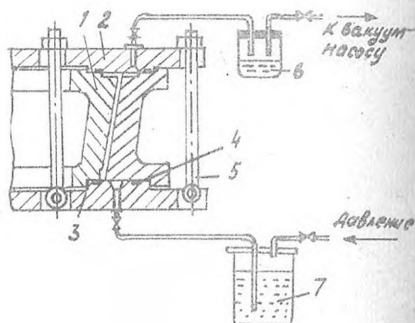
3) высокое качество рабочих поверхностей;

4) такое расположение пропиточных каналов, чтобы связующее обеспечило одновременную пропитку наполнителя по возможно большей поверхности;

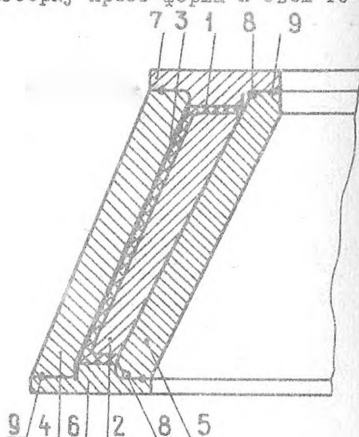
5) надежная герметичность по уплотнениям в стыках деталей пресс-формы;

6) наличие устройств, упрощающих разборку пресс-формы и съем готовых деталей.

На рис. 6.8 схематично показана типовая пресс-форма для изготовления кольцевых оболочек. С целью улучшения фиксации и уплотнения пропитываемого



Р и с. 6.7. Схема изготовления деталей пропиткой под вакуумом и давлением: 1—пресс-форма; 2, 3—крышки; 4—уплотнения; 5—винтовые зажимы; 6—бачок-ловушка; 7—бачок со связующим



Р и с. 6.8. Пресс-форма для изготовления кольцевых оболочек: 1—формуемая деталь; 2—сегментные вставки; 3—цулага; 4—наружный корпус; 5—внутренний корпус; 6, 7—крышки; 8—канал для связующего; 9 — уплотнения

пакета наполнителя в конструкцию пресс-формы введена цулага (листоная металлическая накладка).

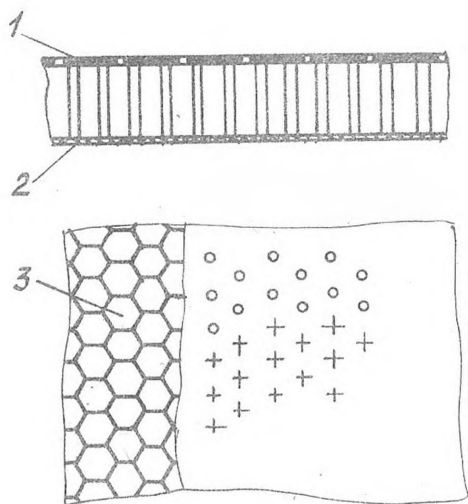
Пакет наполнителя, предназначенный для пропитки, подготавливается до установки в пресс-форму в соответствии с заданной структурой армирования. В частности, для формирования колец статора вентилятора может быть применена стеклоткань объемного переплетения, армированная углеродной лентой в заданных соотношениях и направлениях армирования.

После укладки пакета наполнителя в пресс-форму процесс пропитки производится следующим образом. Собранный пресс-форма помещается в электропечь, присоединяется вакуумная арматура и арматура для подвода связующего от пропиточной установки. Пресс-форма с заготовкой и связующее в бачке нагреваются до 60°C . На подводящей и отводящей линиях подачи связующего открываются краны, включается вакуум-насос. При достижении в полости пресс-формы остаточного давления 50 мм.рт.ст. в бачок со связующим через редуктор подается из баллона под давлением 0,15...0,2 МПа инертный газ, под действием которого связующее из бачка поступает в пресс-форму. Вакуум и давление поддерживаются в течение всей пропитки. После того как связующее начинает поступать без пузырьков воздуха, пропитка прекращается. Отверждение проводится в печи по режимам, предусмотренным технической документацией на данное связующее. Готовое изделие извлекается из пресс-формы и поступает на отделочные операции.

6.6. Изготовление сотовых звукопоглощающих конструкций (ЗПК)

Композиционные ЗПК находят все возрастающее применение в ГТД, поскольку они обеспечивают снижение массы и трудоемкости изготовления, а также улучшение акустических характеристик по сравнению с металлическими ЗПК /26/.

На рис. 6.9 показан один из вариантов ЗПК, примененный для изготовления створок и оболочек реверсивного устройства. ЗПК состоит из двух обшивок, между которыми расположен стеклосотовый наполнитель. Одна из обшивок выполнена из титанового листа толщиной 0,3 мм и имеет перфорацию, вторая непроницаемая обшивка изготовлена из стеклоткани, пропитанной полиимидным связующим (препрег). Стеклосотовый наполнитель заданной толщины нарезается из блоков тканого стеклосотопласта. Соединение обшивок с наполнителем производится с помощью



Р и с. 6.9. Композиционная звукопоглощающая конструкция: 1—перфорированная металлическая обшивка; 2—непроницаемая стеклопластиковая обшивка; 3—стеклосотовый наполнитель

направлением основы ткани). После этого препрег закрывается фторопластовой пленкой, листовой металлической накладкой (цулагой) и вакуумной тканью марки "500" или СТАМ-2, которая герметично закрепляется с помощью механических зажимов по всему периметру формы. При вакуумном формовании приспособление с собранным пакетом ЗПК помещается в термопечь и к рабочей полости подключается вакуум-система. При вакууме 0,02 МПа производится подъем температуры до 100°C. Затем вакуум уменьшается до 0,06 МПа, температура поднимается до 170°C и дается выдержка в течение 5...5,5 ч. После охлаждения вместе с печью изделие извлекается из формы и поступает на контрольные операции и механическую обработку.

6.7. Способы изготовления деталей из композиционных материалов с металлической матрицей

Технология получения КМ с металлической матрицей была разработана значительно позже, чем технология полимерных КМ. Это объясняет-

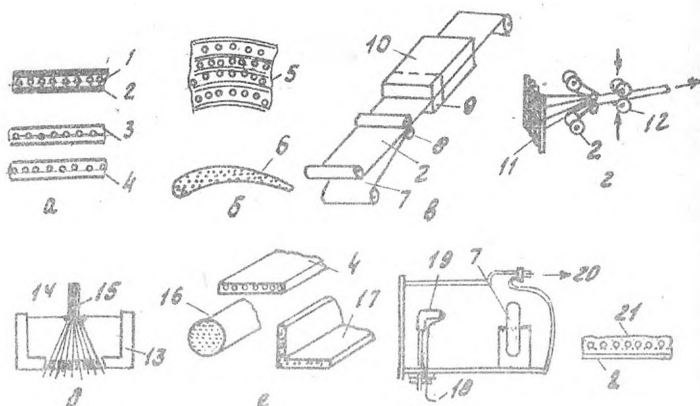
пленочного клея. Изготовление таких ЗПК осуществляется вакуумным формованием или прессованием в автоклаве с помощью герметичной эластичной оболочки (см. разд. 6.1). Как и для других композиционных изделий, технологический процесс начинается с подготовки и контроля качества исходных материалов. Рабочая поверхность формы покрывается фторопластовой пленкой, после чего производится укладка исходных заготовок в следующей последовательности: титановая обшивка, сотовый наполнитель с нанесенной на его торцы клеевой пленкой и два слоя препрега стеклоткани (со взаимно перпендикулярным

ся особыми проблемами изготовления и использования металлических КМ и, прежде всего, проблемами совместимости волокон и матриц. Основными преимуществами металлической матрицы является повышенная теплоустойчивость, большая ударная вязкость и пластичность при низких температурах, что повышает стойкость КМ к распространению трещин. Пики напряжений на порванных волокнах трансформируются благодаря пластической деформации металла, и дальнейшее распространение трещин при разрыве отдельных волокон замедляется. Кроме того, металлические КМ характеризуются повышенным сопротивлением эрозии и поперечному изгибу и большим модулем упругости. К недостаткам металлических КМ следует отнести больший удельный вес, а также большую трудоемкость и, следовательно, стоимость. Рассмотрим способы изготовления деталей с алюминиевой и титановой матрицами /60/.

6.7.1. Изготовление деталей из КМ с алюминиевой матрицей

Методы первичного производства. Целью первичного производства является объединение волокна и матрицы, обеспечивающее максимально возможное использование желаемых свойств каждого из компонентов. Для этого процесс производства должен обеспечивать: отсутствие механического повреждения волокон и падения их прочности, исключение охрупчивания матрицы, создание достаточно прочной связи на границах раздела компонентов, получение дешевого материала и полуфабрикатов. Методами первичного производства получают полуфабрикаты простой конфигурации: монослойные листы и ленты, многослойные плиты и балки постоянного сечения. Эти методы по использованным в них процессам делятся на твердофазные, жидкофазные и осаждения. Основные процессы первичного производства представлены на рис. 6.10 /60/.

Твердофазные процессы основаны на эффекте диффузии соседних слоев (фольги) матрицы. Связь между матрицей и волокном может быть различной — от чисто механической со слабым сцеплением до металлической. Диффузионная сварка — наиболее универсальный и широко распространенный процесс производства КМ с алюминиевой матрицей. Горячее прессование (см. рис. 6.10) осуществляют после формирования пакета из слоев волокон и матричной фольги. Слой волокна изготавливают намоткой на модифицированном токарном станке с закреплением органическим связующим (акрильным, полистироловым) и последующей разрезкой. Горячее прессование КМ (50% борных волокон) осуществляется в течение 1 ч под давлением 490 МПа при температуре 480°C. Этот процесс не



Р и с. 6.Ю. Схематическое изображение основных процессов первичного производства: а-горячее прессование монослойной ленты; б-горячее прессование лопатки в закрытой пресс-форме; в-ступенчатое прессование монослойной ленты; г-прокатка ленты; д - непрерывное литье полуфабрикатов; е-плазменное напыление монослойной ленты; 1-уложенные волокна; 2-фольга; 3-монослойная лента, частично уплотненная в результате нагрева и приложения давления; 4-полностью уплотненная монослойная лента; 5-многослойная заготовка; 6-лопатка; 7-фольга и уложенные волокна; 8-механизм подачи; 9-зона предварительного нагрева; 10-матрица для горячего прессования; 11-катушки с волокнами; 12-диффузионная сварка; 13-жидкий металл; 14 - принудительная укладка волокон; 15-полученный пруток; 16 - круглый стержень; 17-уголок; 18-подача порошка; 19-плазменная горелка; 20-вакуумная система; 21-пористый плазменно напыленный металл.

является непрерывным. Однако изделия сложной конфигурации (лопатки вентилятора) можно прессовать в закрытых пресс-формах или использовать изостатическое прессование за одну операцию. Применяют также ступенчатое прессование и прокатку. КМ, армированный проволокой из нержавеющей стали, можно получить сваркой взрывом.

Жидкофазные процессы используются при вакуумной пропитке и непрерывном литье. При этом волокна бора надо защищать покрытием.

К процессам осаждения относятся плазменное напыление, электролитическое осаждение и осаждение из паровой фазы. Последние два способа имеют ограничения по составу матрицы и скорости осаждения. Наиболее важное значение имеет плазменное напыление (см.рис.6.Ю,е).

После напыления горячим прессованием производят компактирование материала.

Процессы порошковой металлургии приводят к разрушению волокон бора.

Методы вторичного производства. Существенная анизотропия свойств усложняет процессы вторичного производства. Однако в настоящее время они успешно развиваются.

При изготовлении деталей сначала формуются в сложную конфигурацию ленты полуфабриката, а затем они соединяются пайкой, диффузионной сваркой и другими методами. Лучшие результаты дает формовка при повышенных температурах (около 450°C). Соединение отдельных деталей (в том числе из КМ и металла) осуществляется пайкой внахлестку, точечной и диффузионной сваркой. При клепке наблюдается механическое повреждение волокон. Механическая обработка резанием В-Дс затруднена из-за высокой твердости и сдвигового разрушения борных волокон. Лучшие результаты дают электрискровой и ультразвуковой виды обработки. Для повышения поперечной прочности КМ с алюминиевой матрицей применяют термическую обработку.

6.7.2. Изготовление деталей из КМ с титановой матрицей

Первичное производство. Для первичного производства используются следующие технологические процессы:

получение ленты из волокон и фольги, из волокон и фольги с желобками, из совместно намотанных проволок и фольги с применением летучего связующего;

получение ленты методом плазменного напыления;

получение ленты прокаткой пакета;

совместная экструзия (при пластичных волокнах).

Вторичное производство. Готовое изделие из лент КМ с титановой матрицей получают либо вакуумным горячим прессованием в пресс-формах, либо изостатическим горячим прессованием в автоклаве с газом (газостате). В обоих случаях диффузионное соединение осуществляется при температуре $760...870^{\circ}\text{C}$ и давлении $70...100\text{ МПа}$. Из КМ, полученных совместной экструзией, изделие изготавливают изотермической ковкой или прокаткой до листа.

Изотермическую ковку применяют для получения КМ, армированных бериллием, так как он пластичен. По сравнению с горячим вакуумным прессованием изотермическая ковка является более производительным

процессом. Следует отметить, что пресс-формы для горячего вакуумного прессования изготавливают из никелевых суперсплавов. Их поверхности для предотвращения сваривания элементов пресс-формы и изготавливаемых деталей покрывают коллоидным графитом с порошком карбида бора.

6.7.3. Изготовление лопатки вентилятора

В качестве примера приведем основные этапы технологического процесса изготовления лопатки вентилятора из КМ с матрицей из сплава $Ti+6Al+4V$, армированного волокнами борсика:

формовка заготовки в виде фольги сплава $Ti+6Al+4V$ толщиной 0,065 мм в условиях ползучести при температуре 650...760°C с целью придания формы, близкой к форме лопатки;

обрезка заготовки по заданному контуру;

получение намоткой с летучим связующим слоя борсика;

вырезка по контуру и формовка (скручивание и изгибание по форме лопатки) в условиях ползучести при температуре 1350°C;

таблетирование и укладка пакета, кромочных и замковых вставок в составную герметизирующую оболочку из нержавеющей стали, выполненную по форме лопатки;

горячее прессование сборки в условиях динамического вакуума в пресс-форме из суперсплава. Отгонка летучего связующего происходит при температуре 370°C. При прессовании верхнюю и нижнюю части пресс-формы нагревают индукционным методом до температуры 845...870°C, а затем плавно увеличивают давление прессования на гидравлическом прессе усилием 1500 тс. После выдержки в течение 30 мин при указанной температуре сборку охлаждают под умеренным давлением;

удаление герметизирующей оболочки; рентгеновский, ультразвуковой и люминесцентный контроль;

механическая обработка конца пера и замка, ручная зачистка кромок.

Необходимо отметить, что дробление волокна исключается подборкой режима прессования, шлифовкой кромок пресс-формы и регулированием укладки слоев, т.е. структурой армирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для успешного широкомасштабного применения КМ в авиадвигателестроении наряду с преодолением трудностей организационного характера, связанных с недоверием к новым материалам, с созданием специальных производственных участков и специализированных предприятий, оснащенных необходимым оборудованием, с подготовкой соответствующих квалифицированных специалистов, с расширением производства исходных компонентов и др., требуется комплексное решение многих достаточно сложных научно-технических задач, основными из которых являются: обоснованный выбор материала и структуры его армирования; разработка методов и проведение стандартных и специальных испытаний материала и конструкций; разработка конструкции, отвечающей функциональным требованиям; создание перспективной технологии изготовления; разработка методов и осуществление неразрушающего контроля качества готовой продукции; проведение контроля за состоянием и назначение профилактических мероприятий в ходе эксплуатации; разработка методов расчета и оптимизации конструкций с учетом специфики свойств и строения материала, а также условий эксплуатации. Анализ проблем, возникающих при создании конструкций из КМ, показал, что обилие структур армирования и вариантов конструктивно-технологического исполнения приводит к увеличению объема работ. Возрастает роль расчетно-теоретических работ и лабораторных экспериментальных исследований. Важное значение приобретает кооперация специалистов разного профиля.

Необходимо отметить, что в рамки данного пособия вошел ограниченный материал по физико-механическим свойствам КМ, методам расчета и динамике композиционных конструкций. Остался в стороне вопрос статических, динамических и специальных испытаний КМ и конструкций. Не рассматривались методы неразрушающего контроля качества, вопросы оптимизации, механизации и автоматизации технологических процессов и др. Решение этих проблем нашло в той или иной степени отражение в научной литературе (см. библиографический список).

Авторы надеются, что ознакомление с учебным пособием не только позволит получить некоторые сведения об опыте применения КМ в ИТД и знания в области композиционных материалов, но и вызовет потребность более глубокого изучения специальной литературы по КМ и решения проблем, связанных с применением композиционных материалов в авиадвигателестроении.

авторы убеждены, что выполнение работ по внедрению КМ и ГТД на высоком профессиональном уровне приведет к успеху и принесет удовлетворение от решения важных и интересных научно-технических проблем.

Библиографический список

1. Композиционные материалы: Справочник /Под ред. Д.М.К а р п и н о с а. - Киев: Наукова думка, 1985. - 592 с.
2. Энциклопедия полимеров. - М.: Советская энциклопедия. 1972, т. 1. - 1224 стб.; 1974, т. 2. - 1032 стб.; 1977, т.3. -1152 стб.
3. П о р т н о й К.И., С а л и б е к о в С.Е., С в е т л о в И.Л., Ч у б а р о в В.М. Структура и свойства композиционных материалов. - М.:Машиностроение, 1979. - 256 с.
4. Композиционные материалы /Под ред. Л.Б р а у т м а н а, Р.К р о к а. - М.: Машиностроение, 1978, т.1 - 437 с.; т.2 - 564 с.; т.3- 512 с; т. 4. - 504 с.; т.5. - 548 с.; т.6. - 295 с.; т.7.-344с.; т. 8. - 264 с.
5. С а й ф у л л и н Р.С. Неорганические композиционные материалы. - М.: Химия, 1983. - 304 с.
6. М а л м е й с т е р А.К., Т а м у ж В.П., Т е т е р с Г.А.Сопротивление полимерных и композитных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. - Рига: Зинатне, 1980. - 572 с.
7. Механика композитных материалов и элементов конструкций /Под общ.ред. А.Н.Г у з я. - Киев: Наукова думка, 1982, т. 1. - 368 с.; 1983, т.2. - 64 с., т. 3. - 262 с.
8. Л е х н и ц к и й С.Г. Теория упругости анизотропного тела. - М.: Наука, 1977. - 416 с.
9. А ш к е н а з и Е.К., Г а н о в Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник. - Л.: Машиностроение, 1980. - 248 с.
10. С к у д р а А.М., Б у л а в с Ф.Я. Прочность армированных пластиков. - М.: Химия, 1982. - 216 с.
11. Пластинки и оболочки из стеклопластиков /В.Л.Б а ж а н о в, И.И.Г о л ь д е н б л а т, В.А.К о п н о в и др. - М.: Высшая школа, 1970. - 408 с.
12. С у х о б о к о в а Г.П. Расчет характеристик жесткости и прочности однонаправленного слоя и многослойных материалов с перекрестным армированием. - В тр.: Проектирование, расчет и испытания конструкций из КМ. М.: ЦАГИ. 1973, вып. 1, с. 5-29.

13. К р и с т е н с е н Р. Введение в механику композитов. - М.: Мир, 1982. - 334 с.
14. Пластики конструкционного назначения /Под ред. Е.Б.Т р о - с т я н с к о й. - М.: Химия, 1974. - 304 с.
15. Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы: Сб. докл. III Всесоюз .конф. (Москва, 1976 г.). - М.: Наука, 1976. - 214 с.
16. Авиационные материалы. Неметаллические композиционные мате- риалы /Под ред. А.Т.Т у м а н о в а, Г.М.Г у н я е в а. - М.:ОНТИ ВИАМ, 1977, вып. 2. - 168 с.
17. Композиционные материалы: Сб. докл. IV Всесоюз .конф. (Мос- ква, 1981 г.). - М.: Наука, 1981. - 304 с.
18. К у з н е ц о в Н.Д., В е с е л о в С.И., С т е п а н е н - к о Н.Д. Применение композиционных материалов в конструкции ГТД. - Проблемы прочности, 1974, № 2, с. 77-84.
19. Усиление корпуса вентилятора ГТД углепластиком. /С.В.Н и - к о л а е в с к и й, А.Ф.Р у м я н ц е в, Ю.В.Т е л ь н о в и др. - В кн.: Авиационные материалы. М.: ОНТИ ВИАМ, 1977, вып. 2, с.132-136.
20. К а р т а ш о в Г.Г., П и с а р е в А.В., С т а р ц е в Н.И., Г о л с т о н о г о в А.П. Применение составных конструкций лопаток ГТД при вибрационной доводке. - В кн.: Аэроупругость турбомашин. Труды ЦИАМ. М.: ЦИАМ, 1985, № 1166, с. 88-89.
21. К а р т а ш о в Г.Г. Влияние различных факторов на вибра- ционные характеристики лопаток газотурбинных двигателей из композит- ных материалов. - Механика композитных материалов, 1981, № 3, с.486- -493.
22. Динамика авиационных газотурбинных двигателей /Под ред. И.А.Б и р г е р а, Б.Ф.Ш о р р а. М.: Машиностроение, 1981. - 232 с.
23. *Flight*, 1982, N 3794, V. 121, p.187.
24. *Militartechnik*, 1975, 95, p.391-393.
25. *Composites Continue to Make Indroads*, 1976, v.217, N22, p.36-37.
26. К у з н е ц о в Н.Д., В е с е л о в С.И., К а р т а ш о в Г.Г. Вибропоглощающие композитные конструкции для газотурбинных двигате- лей. - Механика композитных материалов, 1983, № 5, с. 838-843.
27. С т е п а н е н к о Н.Д., К а р т а ш о в Г.Г. Эксперимен- тальное изучение спектров собственных частот и форм колебаний лопа- ток компрессоров из композиционных материалов и особенности их конст-

руирования. - В кн.: Тез.докл. У Всесоюз. конференции по компрессоростроению. Повышение эффективности и совершенствование компрессорных машин и установок. М., 1978, с. 143-144.

28. К а р т а ш о в Г.Г., Ю д и н В.А. Основные этапы и некоторые проблемы создания композитных элементов конструкции ГТД. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев: КуАИ, 1981, вып. 8, с. 57-67.

29. Г у н я е в Г.М. Проектирование высокомодульных полимерных композитов с заданными свойствами. - В кн.: Композиционные материалы. М.: Наука, 1981, с. 24-28.

30. Кривелли-Висконти И. Конструирование деталей из композиционных материалов. - В кн.: Достижения в области композиционных материалов /Под ред. Дж.П. Иатти. М.: Металлургия, 1982, с. 58-69.

31. Изготовление и исследование вентиляторной лопасти из композиционного материала /А.Ф. Румянцев, Н.Н. Федькова, С.В. Николасьевский и др.- В кн.: Авиационные материалы. М.: ОНТИ ВИАМ, 1977, вып. 2, с. 141-149.

32. П а в л е н к о В.Ф. Силовые установки летательных аппаратов вертикального взлета и посадки. - М.: Машиностроение, 1972. - 284 с.

33. Б и р г е р И.А. Руководство для конструкторов по расчету на прочность газотурбинного двигателя. Расчет лопаток на прочность. - М.: Оборонгиз, 1956, вып. 2; с. 101-110.

34. Ш о р р Б.Ф. Расчет на прочность естественно закрученных лопаток. - Труды ЦИАМ, 1954, № 256, с. 2-18.

35. Г о р ш к о в Л.А. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния естественно закрученных лопаток из композиционного материала. - В кн.: Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении. Труды ЦИАМ, 1980, № 887, с. 77-88.

36. Прочность, устойчивость, колебания /Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Лановко. - М.: Машиностроение, 1968, т. I. - 832 с.

37. С к у б а ч е в с к и й Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. - М.: Машиностроение, 1969. - 544 с.

38. С б о р о в с к и й А.К., Н и к о л ь с к и й Ю.А., П о п о в В.Д. Вибрация судов с корпусами из стеклопластика. - Л.: Судостроение, 1967. - 191 с.

39. С т е п а н е н к о Н.Д. О рациональном армировании конструкций из композиционных материалов. - Докл. АН СССР, 1978, 243, №4, с. 878-881.

40. З и н о в ь е в П.А., Е р м а к о в Ю.Н. Анизотропия диссипативных свойств волокнистых композитов. - Механика композитных материалов, 1985, № 5, с. 816-825.

41. З и н о в ь е в П.А., Е р м а к о в Ю.Н. Диссипация энергии при изгибе многослойных волокнистых композитов. - Изв.вузов.Машиностроение, 1986, № 4, с. 15-20.

42. Я к о в л е в А.П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. - Киев: Наукова думка, 1985. - 248 с.

43. Болотин В.В., Л и т в и н о в А.Н. К теории вибродемпфирующих полимерных покрытий. - Механика полимеров, 1978, № 2, с.269-276.

44. Б о л о т и н В.В., Н о в и ч к о в Ю.Н. Механика многослойных конструкций. - М.: Машиностроение, 1980. - 376 с.

45. К а р т а ш о в Г.Г. Оптимальное армирование композитных элементов конструкции ГТД. - В кн.: Конструкционная прочность двигателей: Тез. Всесоюз. конф. Куйбышев, 1983, с. 83-84.

46. С т е п а н е н к о Н.Д., К о в е ш н и к о в В.Н., Г у н я е в Г.М., Р у м я н ц е в А.Ф. Анизотропия демпфирующих свойств композиционных материалов. - Проблемы прочности, 1982, № 4, с.18-23.

47. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях /Под ред. Г.С.П и с а р е н к о. - Киев: Наукова думка, 1980, т.1. - 536 с., т.2. - 772 с.

48. К а р т а ш о в Г.Г., В я к и н В.Н., К о в е ш н и к о в В.Н., Ю д и н В.А. Резонансные высокочастотные испытания композитных материалов. - В кн.: Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Тез.докл.международного симпозиума. Киев: Наукова думка, 1984, с.156-157.

49. С а м о й л о в и ч Г.С. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин. - М.:Наука, 1969. - 444 с.

50. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагружениях /Под ред. В.Т.Т р о щ е н к о. - Киев: Наукова думка, 1981. - 315 с.

51. Г о н т к е в и ч В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек. - Киев: Наукова думка, 1964. - 288 с.

52. В я к и н В.Н., К а р т а ш о в Г.Г., К о н д р а ш о в Н.С., С у с л и к о в В.И. Демпфирующая способность слоистых материалов. - В сб.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем /Материалы XIII респ. науч.конф. Киев: Наукова думка, 1985, с.215-225.

53. Г о р ш к о в Л.А. О рациональной схеме армирования рабочих лопаток турбомашин из композитных материалов. - Механика композитных материалов, 1981, № 1, с. 98-103.

54. Применение конструкционных пластмасс в производстве летательных аппаратов /Под ред. А.Л.А б и б о в а. - М.:Машиностроение, 1971. - 192 с.

55. К и с е л е в Б.А. Стеклопластики. - М.:Госхимиздат, 1961. 240 с.

56. Р о с а т о Д.В., Г р о в е К.С. Намотка стеклонитью. Перевод с англ. - М.: Машиностроение, 1969. - 310 с.

57. Т е р е б е н и н Б.П. Технологические особенности изготовления крупногабаритных изделий из стеклопластика. - В кн.:Стеклотекстолиты и другие конструкционные пластики. М.: Оборонгиз, 1960, с.49-77.

58. Ц ы п л а к о в О.Г. Основы формования стеклопластиковых оболочек. - Л.: Машиностроение, 1968. - 239 с.

59. В е с е л о в С.И., К ш н я к и н А.М. Опыт применения стеклопластиков для оболочек ДТРД. - В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. Куйбышев: КуАИ, 1974, вып.58, с. 169-177.

60. Волоконные композиционные материалы /Под ред. Дж.Уитона, Э.Скала. - М.: Металлургия, 1978. - 239 с.

Св.план 1986 г. поз. 104

Савелий Иванович В е с е л о в,
Геннадий Григорьевич К а р т а ш о в

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Редактор Г.А. У с а ч е в а
Техн.редактор Н.М. К а л е н ю к
Корректор Н.С. К у п р и я н о в а

Подписано в печать 26.12.86. Б0 07127.
Формат 60х84 1/16. Бумага оберточная белая.
Печать оперативная. Уч.-изд.л. 5,3. Т.1000 экз.
Заказ 376 Цена 25 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.
Обл.тип.им. В.П.Мяги, г. Куйбышев, ул.Венцева, 60.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Г. Теоретические основы механики композиционных материалов и обзор их свойств	4
1.1. Основные понятия и классификация композиционных материалов	4
1.2. Теория армирования	5
1.3. Обзор свойств композиционных материалов	11
2. Область возможного применения композиционных материалов в ГТД	20
2.1. Конструктивное применение композиционных материалов	22
2.2. Применение композиционных материалов для защиты элементов ГТД	24
3. Проектирование и конструирование элементов ГТД из композици- онных материалов	35
3.1. Основные принципы конструирования	36
3.2. Основные этапы проектирования конструкций из композицион- ных материалов	37
3.3. Конструирование композиционных лопаток компрессоров ГТД	39
4. Расчет на прочность лопаток турбомашин из композиционных материалов	43
4.1. Методика расчета на прочность рабочей лопатки ГТД	44
4.2. Определение прочности бороалюминиевой лопатки вентилятора	56
5. Вибропрочность и рациональное армирование композиционных кон- струкций	64
5.1. Теория рассеяния энергии в композиционных материалах и конструкциях	64
5.2. Влияние различных параметров на диссипативные свойства ком- позиционных материалов и конструкций	76
5.3. Аэродинамическое демпфирование конструкций	80
5.4. Рассеяние энергии в слоистых покрытиях и вязкоупругих за- полнителях	82
5.5. Выносливость и вибропрочность композиционных материалов и конструкций	87
5.6. Рекомендации по рациональному армированию композитных конструкций	96
6. Технологические особенности изготовления деталей из КМ	99
6.1. Способы изготовления деталей из полимерных композиционных материалов	99
6.2. Подготовка исходных материалов	103
6.3. Изготовление лопаток компрессора прямым прессованием	104
6.4. Изготовление оболочек намоткой	106
6.5. Изготовление деталей пропиткой под вакуумом и давлением	107
6.6. Изготовление сотовых звукопоглощающих конструкций (ЗПК)	109
6.7. Способы изготовления деталей из композиционных материалов с металлической матрицей	110
Заключение	115
Библиографический список	116