

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ АРМИРОВАННЫХ ДИСКОВ С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

Немировский Ю.В., Янковский А.П.

The numerical method of calculation of rational profiles of the reinforced twirled disks in view of the phenomenon of creeping in them is developed. As criteria of rational designing are used a condition equal-stress reinforcements and a condition equal-strength bonding agent leafs of a disk. Metal-composite disks results of calculations are discussed with use of both criteria of rational designing at flat and space reinforcement. It is shown, that at equal carrying capacity such disks can have weight essentially smaller, than the reinforced disks of constant thickness, or much greater carrying capacity at equality of their weights.

Настоящая работа является продолжением исследований, опубликованных авторами в [1], где изучалась проблема оптимального и рационального профилирования вращающихся армированных дисков газовых турбин на базе критериев кратковременной прочности фазовых материалов с целью минимизации их (дисков) массы. Однако на практике диски газовых турбин эксплуатируются в условиях длительного нагружения (требуемый ресурс работы таких элементов конструкции имеет порядок 10^5 часов [2]) при повышенных температурах, поэтому в них могут активно развиваться деформации ползучести. В связи с этим особую актуальность приобретает вопрос о рациональном профилировании металлокомпозитных дисков (которые в последнее время находят все более широкое применение на практике) с учетом развития деформаций ползучести в них.

Рассмотрим диск симметричной относительно срединной плоскости структуры, имеющий переменную толщину $H(r)$ и армированный N семействами волокон, причем армирование может осуществляться в плоскостях, параллельных срединной плоскости – плоское армирование (рис. 1, а в [1]), или по поверхностям, расстояние между которыми изменяется пропорционально изменению $H(r)$ – пространственное армирование (рис. 1, б в [1]). Исследуется лишь случай осесимметричного растяжения диска при постоянной угловой скорости, так как это главный этап расчета вращающегося диска на прочность [3, 4]. Диск подчиняется обычным упрощающим гипотезам [3, 4].

В силу известного формального сходства определяющих уравнений установившейся ползучести (в рамках теории течения [5]) и деформационной теории пластичности [3], частным случаем которой является теория упругости, для решения задачи рационального профилирования армированных дисков, работающих в условиях установившейся ползучести фазовых материалов, можно воспользоваться алгоритмами, разработанными в [1], модифицировав их применительно к использованию метода секущего модуля, с помощью которого приближенно решаются задачи как в рамках деформационной теории пластичности [3], так и в рамках теории течения установившейся ползучести [5]. При этом в [1] нужно принять коэффициент Пуассона связующего ν равным 0,5, коэффициенты линейного теплового расширения α, α_k фазовых материалов – равными нулю, а под E, E_k следует понимать секущие модули связующего и арматуры k -го семейства. Кроме того, под ϵ_{ij} в [1] нужно понимать не деформации, а скорости деформаций установившейся ползучести.

Для получения практически приемлемого решения рационального профилирования композитных дисков на напряженное или деформированное состояние в фазах композиции нужно наложить определенные ограничения. В условиях ползучести для

дисков газовых турбин в качестве такого ограничения выступает предельно допустимое значение скорости деформации ползучести $\dot{\epsilon}_{\max}$ [2]:

$$|\dot{\epsilon}| \leq \dot{\epsilon}_{\max} = 10^{-9} \text{ 1/ч.} \quad (1)$$

На основании известных для фазовых материалов законов установившейся ползучести можно определить и соответствующие $\dot{\epsilon}_{\max}$ предельные значения напряжений σ_c в фазах композиции диска.

Рассмотрим конструкцию, состоящую из диска, ограниченного контурами радиусов $r_0 = 0,05$ м, $r_1 = 0,1975$ м, и лопаток длиной $l = 0,114$ м [6]. Диск изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т и армирован стальной проволокой У8А. В условиях установившейся ползучести поведение этих материалов удовлетворительно описывается степенным законом

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^m, \quad (2)$$

а их физико-механические характеристики при температуре $T \approx 200$ °С приведены в табл. 1. (Значения σ_c в табл. 1 получены на основании законов установившейся ползучести (2) с учетом значения $\dot{\epsilon}_{\max}$ из (1).) Лопатки изготовлены из сплава Д16Т и продольно армированы борными волокнами ($\rho_* = 2500$ кг/м³ [8]) с плотностью $\omega_* = 0,6$.

Таблица 1.

Физико-механические характеристики фазовых материалов диска [2, 7, 8]

Материал	m	$B, (\text{МПа})^{-m} \cdot \text{ч}^{-1}$	$\sigma_c, \text{МПа}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Сплав Д16Т	6,0	$3,5 \cdot 10^{-15}$	8,116	2800
Проволока У8А	24,982	$1,054 \cdot 10^{-84}$	1003	7800

На рис. 1, 2 изображены профили дисков, изготовленных из указанной композиции при разных структурах армирования и разных критериях рационального проектирования.

Ломанные l на этих рисунках изображают профили, соответствующие эталонным дискам. Под эталонными в настоящей работе понимаются диски с теми же характерными параметрами армирования, что и профилированные диски, но имеющие постоянную толщину $H = h_* = \text{const}$ (здесь h_* – толщина лопатки). Следовательно, в эталонных дисках не выполняются условия рационального проектирования, а их несущая способность определяется методами, аналогичными тем, что использованы в [9], но с учетом указанного выше изоморфизма между определяющими уравнениями деформационной теории пластичности и теории течения установившейся ползучести и с применением метода секущего модуля.

Оба рисунка соответствуют дискам, полотно которых армировано в радиальном направлении, но структура армирования профилированных дисков при этом может быть плоской или пространственной.

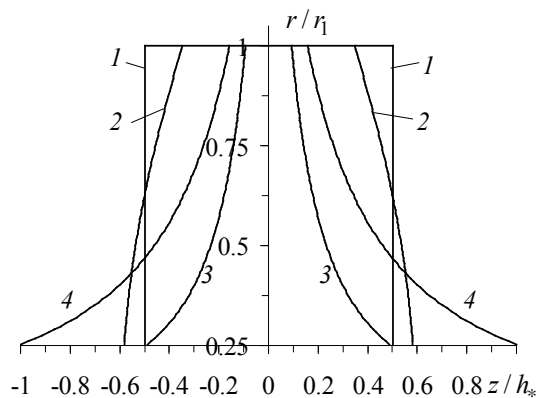


Рис. 1. Рациональные профили металлокомпозитных дисков при радиальном равнонапряженном армировании

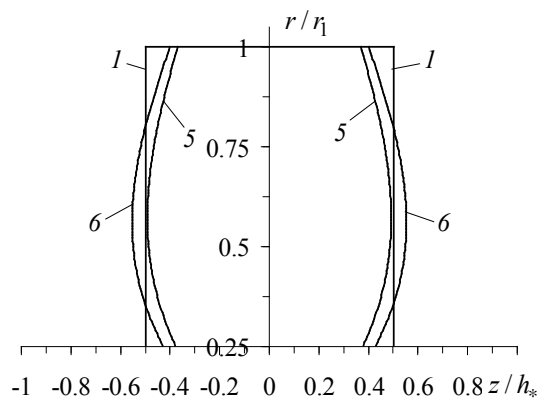


Рис. 2. Рациональные профили металлокомпозитных дисков при радиальном армировании и равнопрочном связующем

На рис. 1 изображены профили дисков, радиально армированных равнонапряженными волокнами, причем плотность армирования на внутреннем контуре $\omega_{01} = 0,7$. Методом, аналогичным изложенному в [9], было установлено, что при этом значении ω_{01} несущая способность эталонного диска определяется величиной $n = 9505,93$ об/мин (при этом во внутренней точке $r = 0,589r_1$ полотно диска интенсивность скоростей деформаций ползучести в связующем $\dot{\epsilon}_i$ достигает предельного значения $\dot{\epsilon}_{\max}$ из (1), а интенсивность напряжений в связующем – предельного значения σ_c для сплава Д16Т, см. табл. 1).

Кривые 2 на рис. 1 задают рациональный профиль диска при плоском (см. рис. 1, а в [1]), а кривые 3 – при пространственном (см. рис. 1, б в [1]) армировании. Массы этих дисков, отнесенные к массе эталона, приведены в табл. 2, из которой следует, что использование плоского равнонапряженного армирования позволяет уменьшить массу диска всего на 5,6 %, а пространственного равнонапряженного армирования – на 47,1 % при $n = 9505,93$ об/мин. При этом напряжение в арматуре $\sigma_a = 0,5705\sigma_{ca}$ (здесь σ_{ca} – предельно допустимое напряжение σ_c для армирующей проволоки У8А, см. табл. 1), а интенсивность скоростей деформаций установившейся ползучести в связующем $\dot{\epsilon}_i$ достигает предельно допустимого значения (1) на внешнем контуре ($r = r_1$).

Таблица 2.

Относительная масса M рационально профилированных дисков

Характеристика решения	Номер профиля диска на рис. 1, 2					
	1	2	3	4	5	6
M	1,0	0,9441	0,5288	0,9984	0,8968	1,0003

За счет рационального профилирования полотна диска можно повысить его несущую способность по сравнению с эталонным диском. Так, при пространственном армировании за счет увеличения массы рационально профилированного диска его несущую способность можно увеличить до $n = 12300$ об/мин. Профиль такого диска изображен на рис. 1 кривыми 4, а его масса примерно равна массе эталонного диска (см. табл. 2).

Так как напряжения в равнонапряженных волокнах постоянны и равны $\sigma_a = 0,5705\sigma_{ca}$, т.е. несущая способность волокон используется всего на 57,05 %, а интенсивность скоростей деформаций ползучести в связующем $\dot{\epsilon}_i$ достигает предельно допустимого значения (1) только на внешнем контуре, то возникает вопрос: нельзя ли за счет требования «равнодеформируемости» связующего

$$\dot{\epsilon}_i(r) = \dot{\epsilon}_{\max} = \text{const}, \quad r_0 \leq r \leq r_1 \quad (3)$$

улучшить характеристики диска по сравнению со случаем равнонапряженного армирования?

Действительно, из (2) следует, что при выполнении условия (3) интенсивность напряжений в связующем σ_i будет постоянна, причем $\sigma_i(r) = \sigma_c = \text{const}$, где σ_c – предельно допустимое напряжение в связующем (см. табл. 1 для материала Д16Т), а значит, при выполнении равенства (3) в связующем реализуется условие равнопрочности. В силу этого при условии (3) несущая способность связующего используется более полно, чем ранее при $\sigma_a = \text{const}$, и кроме того, в случае (3) напряжения в арматуре на внутреннем контуре будут больше, чем в случае условия равнонапряженности волокон $\sigma_a = \text{const}$. Следовательно, несущая способность волокон, по крайней мере в некоторой окрестности внутреннего контура $r = r_0$, при $\sigma_i(r) = \sigma_c = \text{const}$ будет использоваться более полно, чем при условии $\sigma_a = 0,5705\sigma_{ca} = \text{const}$.

Кривые 5 на рис. 2 определяют рациональный профиль диска при плоском радиальном армировании полотна в случае использования критерия (3) при $\omega_{01} = 0,7$ и $n = 9505,93$ об/мин. Относительная масса m такого диска приведена в табл. 2, из которой следует, что использование плоского армирования позволяет уменьшить массу диска на 10,32 %. Сравнение масс дисков, соответствующих профилям 4 на рис. 2 и 2 на рис. 1, показывает, что, как и предполагалось, критерий рационального проектирования (3) приводит к более эффективному проекту по сравнению с условием равнонапряженности арматуры $\sigma_a = \text{const}$. При этом максимальное значение напряжения в арматуре достигается на внутреннем контуре: $\sigma_a(r_0) = 0,8968\sigma_{ca}$, а $\sigma_i(r) = \sigma_c = \text{const}$, т.е. несущая способность фазовых материалов используется более полно, чем ранее при $\sigma_a(r) = 0,5705\sigma_{ca} = \text{const}$. (При использовании критерия (3) в случае пространственного армирования разработанный итерационный процесс решения рассматриваемой задачи для исследуемой композиции расходится, поэтому пока не удалось получить соответствующий рациональный профиль диска.)

Как и в случае использования критерия равнонапряженного армирования, за счет рационального профилирования диска с равнопрочным связующим можно повысить его несущую способность по сравнению с эталонным диском. Так, при плоском армировании за счет увеличения массы рационально профилированного диска его несущую способность в случае использования критерия (3) можно увеличить до $n = 9920$ об/мин. Профиль такого диска изображен на рис. 2 кривыми 6, а его масса равна массе эталонного диска (см. табл. 2). Напомним, что при использовании критерия равнонапряженности арматуры в случае пространственного армирования удалось получить $\max n = 12300$ об/мин при массе профилированного диска, равной массе эталонного (см. профиль 4 на рис. 1).

Поведение кривых 5, 6 на рис. 2 показывает, что при использовании критерия рационального проектирования (3) для рассматриваемой Д16Т–У8А-композиции получаем необычные бочкообразные профили полотна диска. Такие «экзотические» профили порождаются условием (3) и неоднородностью композитного материала

диска. Действительно, согласно формуле (5) из [1], плотность армирования ω_1 при плоской радиальной структуре армирования полотна диска определяется равенством $\omega_1(r) = r_0 \omega_{01} / r$, $r_0 \leq r \leq r_1$. Следовательно, структура армирования по радиусу r неоднородна, а значит, и композитный материал полотна диска в целом неоднороден. Такая неоднородность и приводит к возможности появления профилей, качественно отличных от традиционно используемых профилей дисков [3, 4], выполненных из однородных конструкционных сталей. (Традиционно используемые профили, как правило, качественно похожи на профили 3, 4 на рис. 1.)

Для других композиций рациональные профили, полученные при использовании критерия (3), могут получиться подобными профилям 3, 4 на рис. 1, т.е. качественно подобными традиционным профилям дисков.

Кроме радиальных структур армирования авторами были исследованы и случаи радиально-окружного армирования полотна диска с равнонапряженной арматурой радиального семейства и при использовании критерия (3). В этих случаях также удалось получить определенный эффект снижения массы рационально профилированных дисков, но величина этого эффекта все же значительно меньше, чем в случае профиля 3 на рис. 1. Так, для диска с плоским радиально-окружным армированием при условии равнонапряженности волокон радиального семейства получили снижение массы полотна диска на 31,6 %. (Соответствующий рациональный проект не изображен.)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (08-01-00046-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Немировский Ю.В., Янковский А.П. Рациональное профилирование армированных вращающихся дисков // Механика композитных материалов. – 2002. – Т. 38, № 1. – С. 3 – 24.
2. Безухов Н.И., Бажанов В.Л., Гольденблат И.И., Николаенко Н.А., Синюков А.М. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / Под ред. И.И. Гольденבלата. – М.: Машиностроение, 1965. – 568 с.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
4. Биргер И.А., Демьянушко И.В. Расчет на прочность вращающихся дисков. – М.: Машиностроение, 1978. – 247 с.
5. Качанов Л.М. Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1960. – 456 с.
6. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. III. – М.: Гос. н. изд-во машиностроит. лит., 1959. – 1120 с.
7. Никитенко А.Ф., Любашевская И.В. Кинетическая теория ползучести и расчет элементов конструкций на длительную прочность. Сообщение 1. Напряженно-деформированное состояние неравномерно нагретых толстостенных труб // Проблемы прочности. – 2005. – № 5. – С. 30 – 44.
8. Композиционные материалы. Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 592 с.
9. Немировский Ю.В., Янковский А.П. О влиянии структуры армирования на несущую способность термоупругих металлокерамических вращающихся дисков // Проблемы прочности. – 2001. – № 4. – С. 5 – 24.