

## НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.3

И. Х. БАДАМШИН

## РАСЧЕТ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Приведены результаты расчета модуля упругости для поликристаллов, используемых в качестве основы в металлических матрицах композитов и жаропрочных сплавов в ГТД. Используется формула, выведенная автором на основе фундаментальных закономерностей: закона Кулона и закона Гука. Результаты расчетов модуля упругости применимы, в частности, для проектирования композитных материалов. *Рабочая лопатка турбины; композитный материал; монокристалл; поликристалл; модуль упругости*

Одним из перспективных направлений развития газотурбинных двигателей является применение рабочих лопаток турбины, изготовленных из эвтектических композитных материалов или фазоармированных материалов. Армирующим волокном в таких материалах является нитевидный монокристалл тугоплавких металлов и их карбидов [1].

В качестве исходных данных для расчета композитных материалов используется ряд механических, теплофизических и физических характеристик составляющих композитного материала. В том числе модуль упругости (модуль Юнга) с учетом анизотропии свойств [2].

В настоящее время модуль упругости для металлов и их соединений определяется, как правило, экспериментально.

Задачей работы является расчетное определение важнейшей упругой характеристики – модуля упругости – которая является основной для многих прочностных расчетов. Задачей работы также является существенное сокращение дорогостоящих экспериментов (в некоторых случаях на уникальном оборудовании), что значительно снижает экономические и временные затраты в процессе проектирования элементов машин и оборудования, изготовленных, в частности, из эвтектических композитных материалов.

Для решения поставленной задачи используется формула расчета модуля упругости для нитевидных монокристаллов, так называемых «усов», т.е. монокристаллов с бездислокационной кристаллической структурой.

В соответствии с патентом (RU 2226266, автор И. Х. Бадамшин), модуль упругости  $E_{\text{юнг}}$  рассчитывается по формуле

$$E_{\text{юнг}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2 a_0^2},$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ , Кл – величина взаимодействующих зарядов, равная заряду электрона;  $\pi = 3,14$ ;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/Нм<sup>2</sup> – электрическая постоянная;  $r$  – расстояние между взаимодействующими зарядами (зависящее от  $a_0$  и кристаллографического направления скольжения); допол-

нительные коэффициенты, учитывающие геометрические особенности кристаллической решетки, в данной работе не приводятся;  $a_0$  – период кристаллической решетки [3].

В частности, результаты расчета модуля упругости с учетом анизотропии свойств для металлов Fe, Ni с бездефектной кристаллической решеткой при 20°С приведены в табл. 1 (источник [4]).

Таблица 1

Наименование элемента, кристаллографическая плоскость	Величина модуля упругости, ГПа		Погрешность, %
	расчет	эксперимент	
Fe (ОЦК)			
(100)	135,7	132	0,7
(110)	235,1	222	5,9
(111)	277,7	284	2,2
Ni (ГЦК)			
(100)	98,6	138	28,5
(110)	209,2	215	2,7
(111)	284,5	262	8,6

Из табл. 1 видно, что результаты расчета удовлетворительно сходятся с результатами эксперимента.

Известно [5, 6], что технические металлы являются поликристаллами, т.е. состоят из большого числа анизотропных кристаллитов (или монокристаллов). Известно также [5], что упругие характеристики поликристаллов по существу являются усредненными значениями упругих свойств монокристаллов. Однако сведения о возможности определения среднего значения модуля упругости поликристаллов, приведенные в [5], являются лишь теоретическим положением, но не рекомендациями к инженерным расчетам. Какие именно величины усредняются и сколько их, в источнике не указано.

Зная значения модуля упругости монокристалла с учетом анизотропии, можно определить величину модуля упругости для поликристалла этого же металла или его соединения следующим образом.



В соответствии с патентом (RU 2277703, автор И. Х. Бадамшин) вначале рассчитывается модуль упругости для наиболее плотноупакованных плоскостей (100), (110), (111) элементарной атомной ячейки монокристалла. Затем рассчитывается модуль упругости поликристалла  $E_{\text{пкр}}$  по формуле:

$$E_{\text{пкр}} = (E_{100} + E_{110} + E_{111})/3,$$

где  $E_{100}$ ,  $E_{110}$ ,  $E_{111}$  — соответственно модули упругости для плоскостей (100), (110), (111).

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование элемента	Величина модуля упругости, ГПа		Погрешность, %	Источник
	расчет	эксперимент		
Fe	213,8	211 (отож.) 223,2	1,3 4,2	[4]
Ni	197,4	196	0,7	[4]
Cr	283,1	288	1,7	[4]
Ta	203,3	186	9,3	[4]
Nb	121,6	118,9	2,3	[4]
Mo	298,6	317,8	6	[4]
W	407,9	393,8	3,5	[4]
ZrO <sub>2</sub>	436,7	—	—	—
NbC	440,4	497, 504, 518, 550	—	[7]
TaC	547,2	515, 550, 730	—	[7]
TiN	440,7	440	—	[7]
Ni <sub>3</sub> Al	188,1	—	—	—

Из табл. 2 видно, что результаты расчета модуля упругости для металлов удовлетворительно сходятся с результатами эксперимента с погрешностью от 0,7 до 9,3%.

Что касается соединений, то экспериментальные данные различных авторов не совпадают. Это, с одной стороны, может быть объяснено недостаточно хорошей аттестацией образцов, а с другой — методическими недочетами [7, 8]. Поэтому погрешность для соединений не рассчитывалась.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты расчетов модуля упругости применимы для оценки упругих характеристик по-

ликристаллов, в том числе соединений, модули упругости которых редко или совсем не встречаются в справочной литературе.

2. Результаты расчетов модуля упругости применимы для проектирования композитных материалов, используемых в газотурбинных двигателях.

3. Одним из направлений развития нанотехнологий является полное трехмерное управление структурой материалов на атомном уровне с целью размещения каждого атома на своем месте. В этих условиях важно заранее знать упругие и прочностные свойства папообъемов монокристаллов с бездефектной структурой. Откуда следует необходимость наличия расчетных формул упругих характеристик, в частности, модуля упругости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпинос, Д. М. Композиционные материалы в технике / Д. М. Карпинос, Л. И. Тучинский, А. Б. Сапожникова [и др.] Киев : Техника, 1985. 152 с.
2. Скибин, В. А. Научный вклад в создание авиационных двигателей : в 2 кн. Кн. 1 / под общ. науч. ред. В. А. Скибина, В. И. Солонина. М. : Машиностроение, 2000. 725 с.
3. Бадамшин, И. Х. Формула расчета модуля упругости / И. Х. Бадамшин // Проблемы машиностроения и надежности машин. М., 2005. № 1, С. 50–52.
4. Свойства элементов : в 2 ч. Ч. 1. Физические свойства : справочник М. : Metallurgia, 1976. 600 с.
5. Химушин, Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф. Ф. Химушин. М. : Metallurgia, 1964. 672 с.
6. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьев. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
7. Андриевский, Р. А. Прочность тугоплавких соединений / Р. А. Андриевский, А. Г. Ланин, Г. А. Рымашевский. М. : Metallurgia, 1974. 232 с.
8. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие покрытия / Г. В. Самсонов, А. П. Эпик. М. : Metallurgia, 1973. 400 с.

## ОБ АВТОРЕ



Бадамшин Ильдар Хайдарович, доц., докторант каф. авиадвигателей. Иссл. в обл. металлофизики и материаловедения.