

И. Х. Бадамшин, О. И. Кусова

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ TiAl И Ni₃Al – ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СПЛАВОВ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Показана возможность теоретического определения модуля Юнга на основе электростатической природы упругости интерметаллидов на примере TiAl и Ni₃Al. Разработанный метод можно использовать для компьютерного моделирования моно- и поликристаллических материалов в условиях отсутствия экспериментальных данных. *Модуль упругости; монокристалл; поликристалл; интерметаллид; рабочая лопатка турбины*

АКТУАЛЬНОСТЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время применение интерметаллидов TiAl в материалах лопаток газовых турбин при температурах до 800 °С является одним из перспективных направлений. В частности, интерметаллид TiAl является основным компонентом сплава типа 46-1-1S (США) и имеет плотность $3,95 \cdot 10^3$ кг/м³, а модуль упругости 168 ГПа [1].

Интерметаллид Ni₃Al является основным компонентом жаропрочных никелевых сплавов для лопаток газовых турбин. Представляет интерес его упругие характеристики в кристаллографическом [111] направлении.

Однако для новых материалов экспериментальная информация об их свойствах весьма ограничена или отсутствует. В свою очередь, для оценки напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток газовых турбин в качестве исходных данных необходимо иметь температурную зависимость модуля упругости материала.

В этих условиях определение теоретических значений упругих характеристик основных компонентов сплава (таких, как интерметаллиды TiAl и Ni₃Al) является актуальной задачей. Это позволяет прогнозировать возможность использования нового материала в лопатках турбин.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Основой метода является электростатическая природа упругости и переход в модели поведения материала от гипотезы сплошности

среды к учету межатомных сил взаимодействия в кристаллической решетке монокристалла [2].

Для решения поставленной задачи используется базовая формула [2]

$$E = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2 (a_0 + \Delta a_0)^2},$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд, равный по модулю заряду электрона; $\pi = 3,14$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/Н·м² – электрическая постоянная; a_0 – период кристаллической решетки; Δa_0 – изменение периода кристаллической решетки; r – расстояние между ближайшими соседями атомами.

В свою очередь, изменение периода кристаллической решетки в зависимости от температуры, определяется по теоретической формуле [2]

$$\Delta a_0 = 0,5 \left(\frac{e^2}{\frac{e^2}{a_0} - c^1_v \Delta T 2\pi\epsilon_0} - a_0 \right)$$

где c^1_v – теплоемкость атома при постоянном объеме; ΔT – изменение температуры.

Исходными данными для расчета модуля упругости являются кристаллическая структура элементарной атомной ячейки и ее период. В частности, для TiAl и Ni₃Al они приведены на рис. 1, а, б.

Структура кристаллической решетки TiAl – тетрагональная гранцентрированная. Период кристаллической решетки $a_0 = 0,4076$ нм, $c = 0,3988$ нм [5].

Структура кристаллической решетки Ni₃Al – гранцентрированная кубическая (ГЦК). Период кристаллической решетки $a_0 = 0,35655$ нм [4].

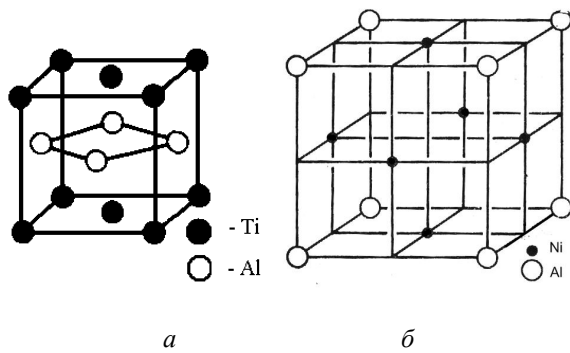


Рис. 1. Кристаллические структуры элементарных атомных ячеек TiAl [3] (а) и Ni₃Al [4] (б)

Расчеты проведены для элементарных атомных ячеек, представленных на рис. 1, а, б, которые, периодически повторяясь, определяют упругие свойства монокристалла в целом. В частности, в табл. 1 представлены результаты расчета модуля упругости, полученные для монокристаллов рассматриваемых интерметаллидов и никеля при температуре 20 °С.

Таблица 1

Результаты расчета модуля упругости для монокристаллов интерметаллидов и никеля при температуре 20 °С

Наименование элемента и направление действия нагрузки	Величина модуля упругости, ГПа		Расхождение, %
	расчетная	экспериментальная	
Ni (ГЦК)			
[100]	140,6	138 [6]	1,8
[110]	210,9	215 [6]	-1,9
[111]	286,7	262 [6]	9,4
Ni ₃ Al (ГЦК)			
[100]	134,0	—	—
[110]	201,0	—	—
[111]	273,3	—	—
TiAl			
[001]	84,6	—	—
[100]	112	—	—
[110]	126,9	—	—
[111]	172,5	—	—

Примечания: [100], [110], [111] – кристаллографические направления в элементарной атомной ячейке

Из табл. 1 видно, что результаты расчета монокристалла никеля имеют удовлетворительную сходимость с результатами экспериментов, приведенных в работе [6]. Для рассматриваемых интерметаллидов экспериментальных данных нет. Однако адекватность модели, подтвержденная результатами исследований на других элементах и соединениях [7], позволяет прогнозировать упругие характеристики TiAl и Ni₃Al и получить их теоретические зависимости модуля Юнга от температуры для монокристаллического состояния. В частности, на рис. 2 такая зависимость приведена для Ni₃Al.

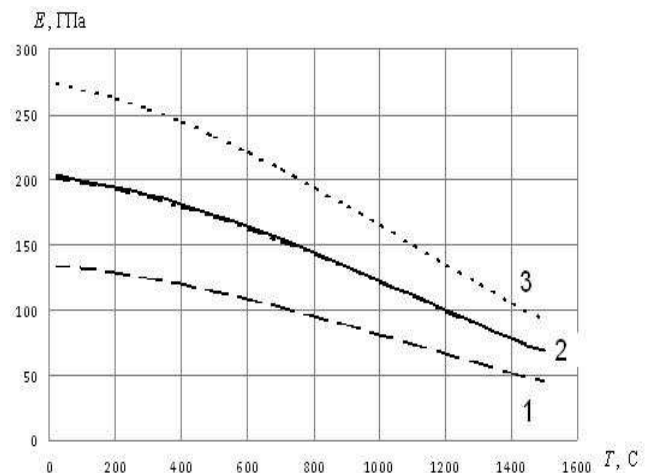


Рис. 2. Теоретическая зависимость модуля упругости Ni₃Al от температуры: 1 – E₁₀₀; 2 – E₁₁₀; 3 – E₁₁₁

Аналогичные расчеты проведены для интерметаллида TiAl (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2

Расчетные значения модуля упругости TiAl и Ni₃Al в направлении [111] в зависимости от температуры

Температура, °С	Модуль упругости E[111], ГПа для	
	TiAl	Ni ₃ Al
20	172,5	273,3
100	169,0	268,3
200	164,3	261,6
300	158,6	253,4
400	151,7	243,9
500	144,1	233,0
600	135,8	220,9
700	126,9	208,0
800	117,4	194,1
900	—	179,8
1000	—	150,0
1100	—	135,0
1200	—	120,2

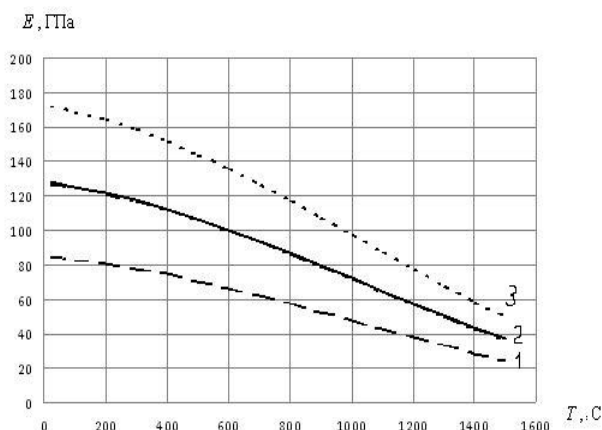


Рис. 3. Теоретическая зависимость модуля упругости TiAl от температуры: 1 – E_{001} ; 2 – E_{110} ; 3 – E_{111}

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность теоретического определения модуля упругости интерметаллидов TiAl и Ni₃Al – основных компонентов сплавов для лопаток газовых турбин. Разработанный метод позволяет использовать его для компьютерного моделирования материалов в условиях отсутствия экспериментальных данных.

2. Получена теоретическая зависимость модуля упругости интерметаллидов TiAl и Ni₃Al от температуры и кристаллографического направления.

3. Полученные результаты являются необходимой составляющей формирования исходных данных для расчета напряженно-деформированного состояния лопаток турбин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов В. И., Ночовная Н. А.** Перспективные жаропрочные материалы на основе алюминидов титана // Научные идеи С. Т. Кишкина и современное материаловедение: Тр. международн. науч.-техн. конф., 25–26 апреля 2006. М: ВИАМ, 2006. 378 с.

2. **Бадамшин И. Х.** Прочность элементов конструкций из эвтектических композитов на основе электростатической природы упругости // Вестник УГАТУ. Т.14, № 2(37). 2010. С. 60–64.

3. **Вакс В. Г.** Упорядочивающиеся сплавы: структуры, фазовые переходы, прочность // Соросовский образовательн. журнал. 1993. № 3. С. 115–123.

4. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки: учеб. для вузов / И. И. Новиков, К. М. Розин М.: Металлургия, 1990. 336 с.

5. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. Т. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.

6. Свойства элементов. В двух частях. Ч. 1. Физические свойства: Справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976. 600 с.

7. **Бадамшин И. Х.** Расчет упругих, физических и теплофизических характеристик эвтектических композиционных материалов, применяемых для рабочих лопаток газовых турбин // Научные идеи С. Т. Кишкина и современное материаловедение: Тр. международн. науч.-техн. конф., 25–26 апреля 2006. М: ВИАМ, 2006. С. 133–135.

ОБ АВТОРАХ

Бадамшин Ильдар Хайдарович, проф. каф. авиац. двигателей. Дипл. инженер по авиац. двигателям (УАИ, 1979). Д-р техн. наук по динамике и прочности машин и приборов (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. испытаний и прочности ГТД.

Кусова Олеся Игоревна, асп. той же каф. Дипл. инженер по авиац. двигателям (УГАТУ, 2010) Иссл. в обл. прочности элементов ГТД.