

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2410759

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ  
ОДНОФАЗНЫХ МЕТАЛЛОВ

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет" (ВолгГАСУ) (RU)*

Автор(ы): см. на обороте

Заявка № 2008145283

Приоритет изобретения 17 ноября 2008 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 января 2011 г.

Срок действия патента истекает 17 ноября 2028 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

Автор(ы): *Кукса Лев Владимирович (RU), Арзамаскова Лариса Михайловна (RU), Сергеев Андрей Викторович (RU)*





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2008145283/28, 17.11.2008

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
17.11.2008

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.11.2008

(43) Дата публикации заявки: 27.05.2010 Бюл. № 15

(45) Опубликовано: 27.01.2011 Бюл. № 3

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: ШЕРМЕРГОР Т.Д. Теория упругости

микронеоднородных сред. - М.: Наука, 1977, 399 с. ЛИФШИЦ И.М., РОЗЕНЦВЕЙГ Л.Н. К теории упругих свойств поликристаллов: ЖЭТФ, 1946, № 11, с.967-973. НИКАНОРОВ С.П., КАРДАШЕВ Б.К. Упругость и дислокации неупругих кристаллов. - М.: Наука, 1985, 250 с. EP 1508801 A1, 23.02.2005.

Адрес для переписки:

400074, г.Волгоград, ул. Академическая, 1,  
ГОУ ВПО ВолгГАСУ, отдел  
интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Кукса Лев Владимирович (RU),  
Арзамаскова Лариса Михайловна (RU),  
Сергеев Андрей Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

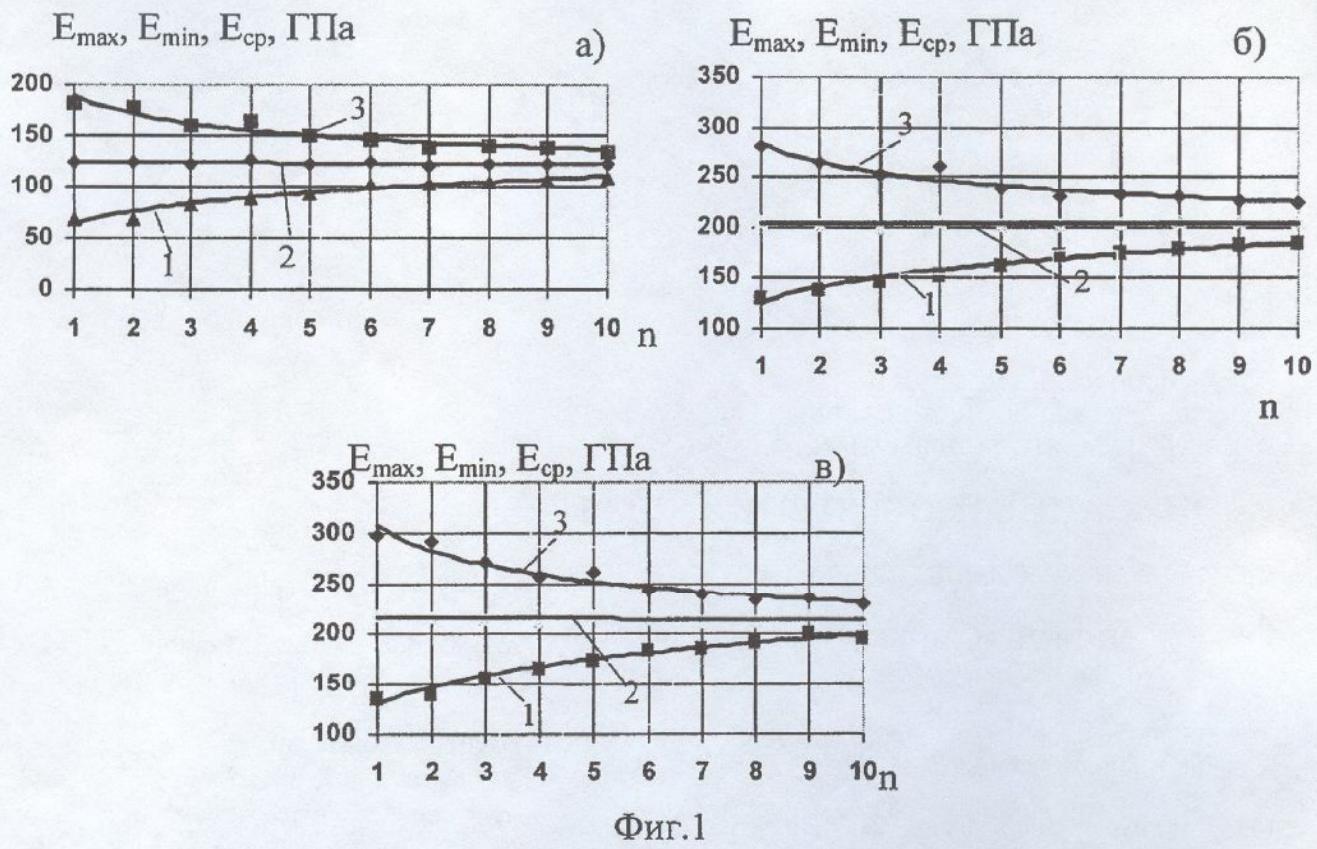
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет" (ВолгГАСУ) (RU)

**(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ОДНОФАЗНЫХ МЕТАЛЛОВ**

**(57) Формула изобретения**

Способ определения упругих свойств однофазных поликристаллических металлов, состоящих из множества различно ориентированных монокристаллов, включающий определение упругих свойств (констант) отдельного монокристалла относительно кристаллографических осей с последующим определением значений упругих свойств отдельного монокристалла в разных направлениях на основе закона преобразования тензора четвертого ранга, отличающийся тем, что средние значения упругих свойств однофазного поликристаллического металла определяются из значений упругих свойств для одного монокристалла из того же материала, что и поликристаллический металл, для всех возможных направлений, исходящих из центра сферической системы координат, путем осреднения всех полученных значений упругих характеристик.

R U 2 4 1 0 7 5 9 C 2



Фиг.1

Заявляемое изобретение относится к исследованиям механических свойств поликристаллических материалов, а именно к методам определения упругих свойств металлов, и может найти применение в разработке методов расчета элементов конструкций и деталей машин, изготовленных из структурно-неоднородных материалов.

Известен способ определения упругих свойств однофазных металлов на основе осреднения, предложенный Хиллом [Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. - М.: Наука, 1977. - 399 с. - прототип].

Осреднение по Хиллу сводится к определению среднего значения упругих модулей  $\langle c_{ij} \rangle$  (осреднение по Фойгту), к определению среднего значения упругих податливостей  $\langle s_{ii} \rangle_R$  (осреднения по Ройссу) и среднего арифметического из этих значений

$$\langle s_{ij} \rangle_H = \frac{1}{2} \left[ \langle c_{ij} \rangle^{-1} + \langle s_{ij} \rangle_R \right] \quad (1)$$

для большого числа различно ориентированных кристаллитов (зерен) однофазного металла.

Используя осреднение Хилла, вычисляются значения модуля Юнга  $E$ , модуля сдвига  $G$  и коэффициента Пуассона  $v$ , соответственно:

$$E_H = \frac{1}{\langle S'_{11} \rangle_H}; \quad G_H = \frac{1}{2(\langle S'_{11} \rangle_H - \langle S'_{12} \rangle_H)}; \quad v_H = \frac{\langle S'_{12} \rangle_H}{\langle S'_{11} \rangle_H}. \quad (2)$$

Связь между напряжениями и деформациями анизотропного тела в тензорной форме задается зависимостями:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl}; \quad (3)$$

$$\epsilon_{kl} = S_{IJKL} \sigma_{kl}$$

где  $\sigma_{ij}$ ,  $\sigma_{kl}$ ,  $\epsilon_{ij}$ ,  $\epsilon_{kl}$  - тензоры напряжений и деформаций, соответственно;

$c_{ijkl}$ ,  $S_{IJKL}$  - упругие модули и податливости.

Компоненты  $c'_{ijkl}$  и  $s'_{ijkl}$  для лабораторной системы координат определяются на основании использования закона преобразования тензора 4-го ранга:

$$c'_{ijkl} = \alpha_{im} \alpha_{jn} \alpha_{kp} \alpha_{kq} c_{mnpq} \quad (4)$$

$$s'_{ijkl} = \alpha_{im} \alpha_{jn} \alpha_{kp} \alpha_{kq} s_{mnpq}$$

Где компоненты тензора 4-го ранга  $c_{mnpq}$  и  $s_{mnpq}$  определяются из известных значений матрицы упругих свойств  $c_{ij}$  и  $s_{ij}$  для кристаллографических осей с использованием правил перехода от матричных обозначений к тензорным,  $\alpha_{im} \alpha_{jn} \alpha_{kp} \alpha_{kq}$  - направляющие косинусы, определяемые с помощью углов  $\phi$  и  $\theta$ , сферической системы координат.

Известный способ сложен в применении, так как приходится неоднократно повторять операции для большого числа случайно-ориентированных зерен (моноцисталлов), при этом затрачивается много времени, и не исключаются ошибки.

Технический результат предлагаемого изобретения представляет собой получение упругих свойств однофазных поликристаллических металлов, т.е. осредненных значений модуля Юнга и модуля сдвига на основе использования одного моноцистала.

Данный технический результат достигается решением технической задачи, направленной на упрощение способа получения упругих свойств поликристаллических материалов за счет определения их осредненных значений для одного моноцистала при использовании сферической системы координат.

Поставленная техническая задача решается за счет того, что в способе определения упругих свойств однофазных поликристаллических металлов, включающем

определение упругих свойств (констант) отдельного монокристалла относительно кристаллографических осей с последующим определением средних значений упругих свойств из полученных для монокристалла значений в разных направлениях на основе закона преобразования тензора четвертого ранга, определение осредненных значений упругих свойств производится для одного монокристалла для всех возможных направлений, исходящих из центра сферической системы координат.

Сущность предлагаемого способа заключается в том, что определение упругих постоянных  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{44}$  для кубических кристаллов и  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{33}$ ,  $S_{44}$  для гексагональных кристаллов производится в результате статических и динамических испытаний для монокристаллов различной ориентации. Углы  $\phi$  и  $\theta$  задаются таким образом, чтобы охваченной оказалась вся сфера, т.е. все возможные направления. Также определяется интервал, через который эти углы задаются, для того чтобы получить конечное число  $n$  значений модуля упругости для всех возможных направлений, исходящих из центра сферы. Длина радиуса-вектора, являющаяся значением модуля упругости или модуля сдвига в заданном направлении, вычисляется в зависимости от долготы  $\phi$  и широты  $\theta$ , задаваемых с определенным интервалом по формулам. Затем выполняется построение векториальных моделей, дающих наглядное представление об анизотропии упругих свойств материалов и их значениях, являющихся исходными данными для определения физико-механических характеристик поликристаллических материалов.

Сокращение времени определения упругих свойств и сохранение точности определяемых значений достигается тем, что в предлагаемом способе используют всего лишь один монокристалл, для которого определяют средние значения упругих свойств по данным для всех возможных направлений, исходящих из центра сферической системы координат.

Используя сферическую систему координат и теоретические зависимости  $E$  и  $G$  для лабораторной системы координат, полученные на основе преобразования тензора 4-го ранга, выражая направляющие косинусы через тригонометрические функции углов  $\phi$  и  $\theta$ , получим уравнение для  $E_i$  и  $G_i$

$$E_i = \frac{1}{S_{11} - 2[(S_{11} - S_{12}) - 0,5S_{44}] \left[ (\sin(\theta_p)\sin(\phi_q))^2 + (\sin(\theta_p)\cos(\phi_q))^2 + (\cos(\theta_p))^2 \right]} \\ Q_i = \frac{1}{S_{44} - 4[(S_{11} - S_{12}) - 0,5S_{44}] \left[ (\sin(\theta_p)\sin(\phi_q))^2 + (\sin(\theta_p)\cos(\phi_q))^2 + (\cos(\theta_p))^2 \right]}$$

где  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  и  $S_{44}$  - значения констант податливости для кубических кристаллов (три константы).

Модуль упругости и сдвига для гексагональных кристаллов определяются по формулам:

$$E_i = \frac{1}{S_{11} \cdot [1 - (\cos(\theta_p))^2] + S_{33} \cdot (\cos(\theta_p))^4 + (2 \cdot S_{13} + S_{44}) \cdot (\cos(\theta_p))^2 \cdot [1 - (\cos(\theta_p))^2]} \\ Q_i = \frac{1}{S_{44} + [(S_{11} - S_{12}) - 0,5 \cdot S_{44}] \left[ 1 - (\cos(\theta_p))^2 + 2 \cdot (S_{11} + S_{33} - 2 \cdot S_{13} - S_{44}) \cdot (\cos(\theta_p))^2 \cdot (\cos(\theta_p))^2 \right]}$$

где  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{33}$  и  $S_{44}$  - значения констант податливости для гексагональных кристаллов (пять констант).

Средние значения модуля Юнга и модуля сдвига определяются по формулам:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}; \bar{G} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{n}$$

где:  $E_i$   $G_i$  - модуль Юнга и модуль сдвига, соответственно, в  $i$ -м направлении;

n - число взятых направлений, охватывающее все возможные.

Предложенный способ определения упругих свойств однофазных металлов поясняется графическим материалом: на фиг.1 представлены зависимости изменения значений модуля Юнга (упругости) для однофазных поликристаллических материалов: а - для меди; б - для железа; в - для никеля; на фиг.2 представлены векториальные модели упругих свойств: модуля Юнга для: а - железа, в - меди, д - титана, ж - цинка; модуля сдвига для: б - железа, г - меди, е - титана, з - цинка.

На фиг.1 графически представлены зависимости максимальных, минимальных и средних значений модуля Юнга (упругости) от числа зерен n в стороне минимального объема для однофазных поликристаллических материалов с кубической и гексагональной решеткой для железа, никеля и меди, где  $E_{\max}$  - кривые 3,  $E_{\min}$  - кривые 1,  $E_{cp}$  - кривые 2.

По результатам представленных на фиг.1 данных видно, что среднее значение модуля упругости практически не зависит от числа случайно ориентированных кристаллитов n, что делает возможным осреднять значения упругих свойств для одного монокристалла. Разброс значений  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  с увеличением числа зерен уменьшается, что позволяет найти минимальный объем, который можно наделить осредненными свойствами макрообъема.

Используя сферическую систему координат, построили векториальные модели модуля Юнга и модуля сдвига кристаллов с кубической и гексагональной решетками (из рассмотрения которых можно судить о высокой анизотропии упругих свойств).

Длину радиуса-вектора вычисляли в зависимости от долготы  $\phi$  и широты  $\theta$ , с заданными интервалами. При этом для изотропного материала векториальные модели представляют собой сферическую поверхность, так как упругие свойства не зависят от направления. Для анизотропных материалов векториальные модели позволяют определить направления по отношению к кристаллографическим осям, для которых значения модуля Юнга и модуля сдвига являются экстремальными, так же векториальная модель дает наглядное представление об анизотропии упругих свойств материалов.

Сопоставление экспериментальных результатов по предложенному способу с результатами прототипа для кубических и гексагональных кристаллов приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Модуль упругости ГПа, E	Кубические кристаллы			
	Алюминий	Железо	Медь	Никель
По прототипу	72	200	118	204
По предложенному способу	69.6	189.7	112.4	200
Процент расхождения, %	3.3	5.2	6.3	2.4

Таблица 2

Модуль упругости ГПа, E	Гексагональные кристаллы			
	Кварц	Магний	Титан	Цинк
По прототипу	98	43	115	82
По предложенному способу	97.1	45.6	120.6	83.6
Процент расхождения, %	0.96	2.43	4.64	1.94

Из приведенных в табл.1 и 2 данных видно, что определение модуля упругости по заявленному способу и определением его по прототипу составляет процент расхождения, находящийся в пределах допустимого, что подтверждает возможность

применения предлагаемого способа определения упругих свойств однофазных металлов при расчетах элементов конструкций и деталей машин.

### Формула изобретения

Способ определения упругих свойств однофазных поликристаллических металлов, состоящих из множества различно ориентированных монокристаллов, включающий определение упругих свойств (констант) отдельного монокристалла относительно кристаллографических осей с последующим определением значений упругих свойств отдельного монокристалла в разных направлениях на основе закона преобразования тензора четвертого ранга, отличающийся тем, что средние значения упругих свойств однофазного поликристаллического металла определяются из значений упругих свойств для одного монокристалла из того же материала, что и поликристаллический металл, для всех возможных направлений, исходящих из центра сферической системы координат, путем осреднения всех полученных значений упругих характеристик.

20

25

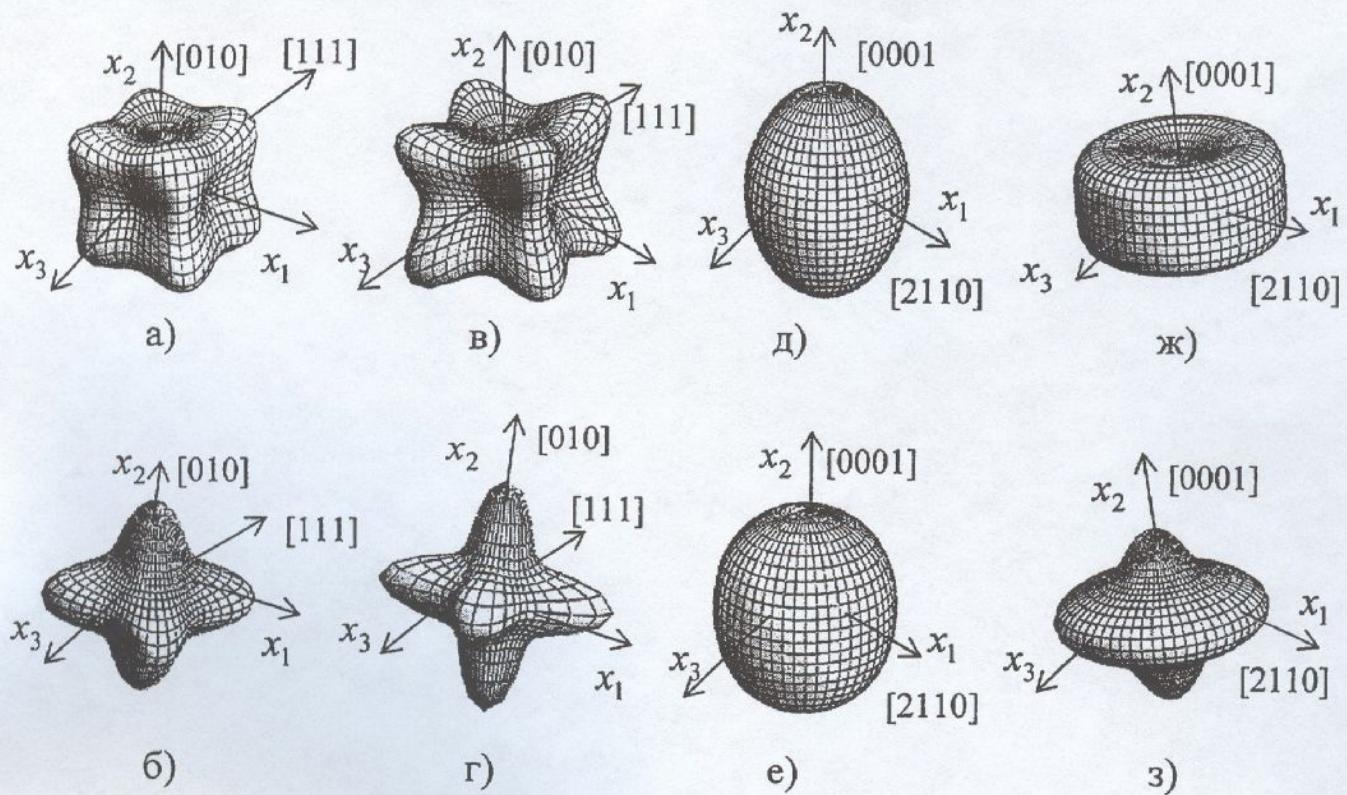
30

35

40

45

50



Фиг.2