

Д. ф.-м. н. А. Р. ГОХМАН, Ю. Н. ИВАНОВ,  
к. ф.-м. н. М. А. ДРОЗДОВ, к. т. н. В. В. ДРОЗДОВА

Украина, г. Одесса, Институт Сухопутных войск

Дата поступления в редакцию  
20.03 2000 г.

Оппонент д. т. н. А. А. БРЮХАНОВ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ «ЭФФЕКТА ТЕКСТУРЫ» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Методика учета ориентационной зависимости упругих свойств открывает новую возможность для совершенствования технологий конструкционных материалов.*

Одной из задач технологии и конструирования является улучшение качества конструкционных материалов в электронной аппаратуре. Это особенно важно в отношении таких стратегических материалов, как титан, используемый для создания корпусов электротехнических приборов в авиа- и ракетостроении. Особую роль при этом играют прочностные и упругие свойства.

Важнейшим элементом структуры твердых тел является кристаллографическая текстура, обуславливающая анизотропию физико-механических свойств поликристаллов и отражающая весь комплекс физических процессов, протекающих в твердых телах при деформации, рекристаллизации и фазовых переходах. В практическом отношении рациональное использование «эффекта текстуры» служит дополнительным резервом улучшения свойств конструкционных материалов и изделий из них по широкому спектру рабочих характеристик.

Титан и его сплавы обладают высокой монокристаллической анизотропией, вследствие чего влияние текстуры таких материалов особенно значительно. Применение количественных методов изучения микроструктуры, в частности, текстуры, а также комплексное изучение анизотропии физических и механических свойств позволяет разделить вклады кристаллографической текстуры, межкристаллитного взаимодействия и свойств кристаллитов в формировании свойств листовых материалов в процессе пластической деформации. Исследования такого рода для большинства титановых сплавов проводились фрагментарно.

Наилучшим сочетанием прочностных и пластических свойств (а именно, достаточно высокой прочностью при удовлетворительной пластичности) в ряду  $\alpha$ - и  $\alpha+\beta$ - титановых сплавов обладает технический титан ВТ1-0, сплавы системы Ti-Al-V: ПТ-3В, ПТ-3Вкт и Ti-3Al-1,5V. В настоящей работе задача найти наиболее оптимальный критерий прочности (пластичности), описывающий переход в опасное состо-

яние, и выяснить роль (в рамках вышеуказанного критерия) влияния межкристаллитного взаимодействия на прочностные свойства исследуемых материалов решается на примере титанового сплава ВТ1-0.

Однако наибольший практический интерес для конструкторских расчетов имеет анизотропия пластических и прочностных свойств листов при различных видах сложнонапряженного деформированного состояния, в частности, эффект текстурного упрочнения. Этот эффект обусловлен повышением напряжения течения текстурованного материала при некоторых условиях нагружения. Коэффициент текстурного упрочнения (КТУ) находится обычно как отношение предела текучести в направлении, нормальном к листу, ( $\sigma_{02}^{\text{нн}}$ ) и минимального значения ( $\sigma_{02}^{\text{мин}}$ ) в плоскости листа.

Коэффициент корреляции между модулем Юнга и пределом прочности для титановых сплавов зависит от ориентации в плоскости листа, степени деформации, и для титановых сплавов близок к единице. На основании этого факта в рассматриваемом случае можно применить гипотезу Ашкенази [1, с. 220] о геометрическом подобии ориентационных поверхностей предела текучести и модуля Юнга:

$$\sigma_{02}^{\text{нн}} / \sigma_{02}^{\text{мин}} = E_{\text{нн}} / E_{\text{мин}} \quad (1)$$

Рассмотрим ориентационную зависимость упругих свойств.

Для исследования был выбран вибрационный метод определения динамического модуля Юнга, при котором в колебании принимает участие весь образец. Из листов исследуемых сплавов электронским методом вырезались под различными углами к направлению прокатки (НП) листа прямоугольные образцы длиной 100 и шириной 10 мм. Оплавленный резкой слой снимался травлением.

Геометрические размеры исследуемых образцов измерялись посредством штангенциркуля и микрометра с погрешностью не хуже 0,1%, а собственная частота колебаний измерялась резонансным методом. В прямоугольном образце, лежащем узлами колебаний на параллельно натянутых тонких нитях в специальном резонирующем держателе, возбуждались колебания. Микрофон, укрепленный в непосредственной близости от образца, преобразовывал звуковые колебания образца в электрические, которые подавались на осциллограф. Резонансная частота, устанавливаемая по фигурам Лиссажу на экране осциллографа, измерялась частотомером, абсолютная

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные ( $E^m$ ) значения модуля Юнга для исходных листов сплава ВТ1-0

Угол с НП, °	0	15	30	45	60	75	90
$E^p, 10^{-10} \text{Н/м}^2$	10,26	10,32	10,39	10,58	10,84	11,07	11,15
$E^m, 10^{-10} \text{Н/м}^2$	10,27	10,30	10,40	10,58	10,83	11,06	11,17

погрешность которого в диапазоне частот 300 – 1000 Гц не превышает 0,3 Гц.

Были проведены исследования по проверке величин случайных погрешностей. Для этого изучалась частота звучания ряда эталонных образцов-камертонов, которая показала, что величина случайных погрешностей не превышает 0,3%. Относительная погрешность при определении модуля Юнга составила около 1%.

Для нахождения явного вида аналитического выражения ориентационной функции  $E(\varphi)$  воспользовались моделированием листов, полученных прямой прокаткой, посредством ортотропного квазикристалла. Для модуля Юнга такая модель определяется уравнением

$$E(\varphi) = (A_0 + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi)^{-1}, \quad (2)$$

где  $A_0, A_2, A_4$  – коэффициенты Фурье-разложения функции, являющиеся параметрами модели.

Коэффициенты  $A_0, A_2, A_4$  находили из минимизации формы:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{E^p(\varphi_i)} - (A_0 + A_2 \cos 2\varphi_i + A_4 \cos 4\varphi_i) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $E^p$  – экспериментальное значение модуля Юнга.

Дифференцируя (3), получаем систему нормальных уравнений относительно  $A_0, A_2, A_4$ :

$$nA_0 + A_2 \sum_{i=1}^n \cos 2\varphi_i + A_4 \sum_{i=1}^n \cos 4\varphi_i = \sum_{i=1}^n (E^p(\varphi_i))^{-1};$$

$$A_0 \sum_{i=1}^n \cos 2\varphi_i + A_2 \sum_{i=1}^n \cos^2 2\varphi_i + A_4 \sum_{i=1}^n \cos 2\varphi_i \cos 4\varphi_i =$$

$$= \sum_{i=1}^n \cos 2\varphi_i (E^p(\varphi_i))^{-1};$$

$$A_0 \sum_{i=1}^n \cos 4\varphi_i + A_2 \sum_{i=1}^n \cos 2\varphi_i \cos 4\varphi_i + A_4 \sum_{i=1}^n \cos^2 4\varphi_i =$$

$$= \sum_{i=1}^n \cos 4\varphi_i (E^p(\varphi_i))^{-1}, \quad (4)$$

где  $n$  – число направлений, в которых экспериментально определялись значения модуля Юнга.

В табл. 1 приведены экспериментальные значения  $E(\varphi)$  и рассчитанные после подстановки найденных величин  $A_0, A_2, A_4$  в (2) для промышленных листов технического титана ВТ1-0. Найдем минимальное значение  $E(\varphi)$  среди указанных направлений. Для этого дифференцируем формулу (2) по углу и приравняем полученное выражение к нулю:

$$\sin 2\varphi (A_2 + 4A_4 \cos 2\varphi) = 0. \quad (5)$$

Решая уравнение (5), находим, что в функции на интервале  $[0^\circ; 90^\circ]$  всегда существует два экстремума:  $\varphi=0^\circ$  (направление прокатки) и  $\varphi=90^\circ$  (направление, перпендикулярное направлению прокатки), а также возможен и промежуточный экстремум для угла, определяемого формулой

$$\varphi_3 = \frac{1}{2} \arccos \left( -\frac{A_2}{4A_4} \right). \quad (6)$$

Из (4) следует, что промежуточный экстремум имеет место только при выполнении условия

$$\left| -\frac{A_2}{4A_4} \right| \leq 1.$$

Последнее соотношение не выполняется как для исследуемых листов технического титана ВТ1-0, так и для большинства  $\alpha$ -титановых сплавов, поскольку из эксперимента известно, что анизотропия  $E(\varphi)$  для них на интервале  $[0^\circ; 90^\circ]$  является монотонной.

Из таблицы видно, что минимальное значение модуля Юнга соответствует направлению прокатки ( $E_{\min} = 10,26 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ). Определение модуля Юнга в направлении нормали к плоскости листа представляет собой самостоятельную задачу. Укажем, что такое определение обычно производят без учета межзеренного взаимодействия (приближение Ройсса или Фойгта). Используя метод (2), можно определить модуль Юнга в направлении прокатки с учетом межзеренного взаимодействия. Результаты расчетов для степени деформации ( $\epsilon$ ) 10, 20, 40, 60 и 80% приведены в табл. 2.

Таблица 2

Модули Юнга в нормали к плоскости листа листового технического титана ВТ1-0, подвергнутого различным обжатиям

$\epsilon, \%$	$E, 10^{-10} \text{Н/м}^2$			
	По Ройссу	По Фойгту	По Хиллу	С учетом межзеренного взаимодействия
10	12,05	12,38	12,22	12,22
20	11,18	11,62	11,40	11,40
40	11,30	11,73	11,51	11,52
60	11,75	12,14	11,95	11,95
80	12,48	12,75	12,61	12,61

Как показано в [1, с. 222], явный вид критерия прочности взаимосвязан с аналитическим выражением для ориентационной зависимости прочностных и пластических свойств. Обычно предполагается, что для титановых материалов корректным является использование критерия Мизеса–Хилла

$$a_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} = 1, \quad (7)$$

где  $a$  – материальный тензор прочности;  $\sigma_{ij}, \sigma_{kl}$  – компоненты тензора приложенного напряжения.

Таблица 3  
Экспериментальная ориентационная зависимость механических свойств  $\sigma_{0,2}$  холоднодеформированных листов сплава ВТ1-0

ε, %	Угол с НП, °						
	0	15	30	45	60	75	90
Исходная	380,1	375,2	364,0	362,1	373,0	388,3	398,0
20	543,1	536,2	524,0	521,1	526,8	545,7	555,7
40	595,4	586,9	570,0	564,2	576,1	596,5	607,0
60	665,0	652,0	631,4	626,0	640,4	665,9	676,2
80	675,5	668,0	664,0	666,0	680,2	706,3	728,2

Таблица 4  
Расчетные значения предела прочности в нормальном направлении к плоскости листа

ε, %	$\sigma_{02}^{нн}$ , МПа			
	По Ройссу	По Фойгту	По Хиллу	С учетом межзеренного взаимодействия
20	567,83	590,17	579,00	579,00
40	621,39	645,04	632,94	633,49
60	716,91	740,71	729,11	729,11
80	807,67	825,15	816,09	816,09

В [1, с. 222] использован критерий Ашкенази, учитывающий, в отличие от критерия Мизеса–Хилла, зависимость прочностных и пластических свойств от гидростатической компоненты внешнего напряжения:

$$\sigma = \frac{1}{A_0 + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi} \cdot \quad (8)$$

Из критерия Ашкенази следует ориентационная зависимость  $\sigma_{0,2}^{-1}(\varphi)$ , которая подтверждается полученными нами результатами для сплава ВТ1-0 (табл. 3).

Вернемся еще раз к КТУ, а именно, рассмотрим КТУ ВТ1-0 в условиях двухосного сбалансированного нагружения ( $\sigma_{нн} = \sigma_{пн}$ ,  $\sigma_{nn} = 0$ , индексы нп, пн и nn

— направление прокатки, поперечное направление и нормальное, соответственно). Воспользуемся результатом [2, с. 348]:

$$КТУ = \sqrt{\frac{\bar{R} + 1}{2}},$$

где  $\bar{R}$  — средняя пластичность в плоскости листа —

$$R = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(\varphi) d\varphi.$$

Например, исходя из экспериментальных данных по  $R(\varphi)$ , получим для исходных и деформированных с обжатием  $\epsilon=20, 40, 60, 80\%$  листов сплава Ti-3Al-1,5V КТУ, равный 1,59, 1,66, 1,69, 1,46, соответственно.

Необходимо заметить, что вклад межзеренного взаимодействия в прочностные свойства может быть получен посредством учета аналогичного вклада в упругие свойства через критерий Ашкенази, учитывающий в явном виде зависимость от гидростатической компоненты тензора напряжений. Этот факт существенно упрощает расчет для значительно более трудно определяемого механического свойства в направлении нормали к поверхности листа по сравнению с упругим свойством (табл. 4).

\*\*\*

Полученные в ходе работы результаты можно рассматривать как базовые для исследования конкретных конструкций. Предлагаемая методика учета ориентационной зависимости упругих свойств позволяет определить модуль Юнга с учетом межзеренного взаимодействия. Последнее открывает новую возможность для совершенствования технологии конструкционных материалов в электронной аппаратуре.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ашкенази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов. — Л. : Машиностроение, 1980.
2. Вишняков Я. Д., Бабарэко А. А., Владимиров С. А., Эгиз И. В. Теория образования текстур в металлах и сплавах. — М. : Наука, 1979.