

## Анизотропия механических характеристик деформированных листов молибденовых сплавов

Б. А. Задерий<sup>а</sup>, С. С. Котенко<sup>а</sup>, А. Е. Маринченко<sup>б</sup>, Е. П. Полищук<sup>а</sup>,  
К. А. Ющенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Национальный авиационный университет, Киев, Украина

*Листовые молибденовые сплавы в деформированном состоянии обладают четко выраженной анизотропией механических характеристик. Анизотропия упругих, прочностных и пластических характеристик обусловлена кристаллографической и структурной текстурами, сформированными в сплавах в процессе прокатки. Максимальные значения предела текучести, независимо от химического состава молибденового сплава, отмечаются для образцов, вырезанных поперек прокатки. Что касается характеристик пластичности, то в этом случае не наблюдается определенной зависимости. Для одних сплавов максимальные значения относительного удлинения достигаются для образцов, вырезанных вдоль прокатки, для других – под углом 45° к направлению прокатки. Предложен тензорный критерий, позволяющий описать полную кривую характеристик прочности или упругости в плоскости листа. Описание кривой анизотропии предела текучести с использованием текстурного анализа не привело к положительному результату, в то время как характер изменения модуля упругости может быть с достаточной точностью описан с помощью такого анализа.*

**Ключевые слова:** молибденовые сплавы, анизотропия, характеристики прочности и пластичности, модуль упругости, кристаллографическая текстура, хладноломкость.

Деформационная анизотропия возникает в листовых молибденовых сплавах в результате пластической деформации в процессе обработки давлением (прокатка). Физико-механические характеристики, обусловленные пластической деформацией металла, не являются постоянными в разных направлениях, т.е. анизотропны. Это объясняется изменением величины касательных напряжений, действующих по различно ориентированным площадкам и обуславливающих неоднозначную степень пластической деформации. При этом наибольшие различия следует ожидать не между продольными и поперечными (по отношению к направлению прокатки) напряжениями, а между продольными и диагональными. Оценка степени анизотропии материала, претерпевшего направленную пластическую деформацию, например, в процессе прокатки, с точки зрения прочностных характеристик образцов, вырезанных вдоль и поперек прокатки, не только недостаточна, но и ошибочна, поскольку существенные различия между механическими свойствами часто наблюдаются для промежуточных направлений.

В настоящей работе рассматривается плоскостная анизотропия механических характеристик тонколистовых молибденовых сплавов, химический состав которых приведен в таблице.

Листы молибденовых сплавов были получены путем многопроходной горячей прокатки при температуре, которая на 100°С ниже температуры

рекристаллизации данных сплавов. Конечная толщина листа составляла 1,2 мм, суммарная степень деформации в процессе прокатки – 88%.

Механические характеристики при одноосном растяжении определяли на образцах, вырезанных из листа под различными углами к направлению прокатки (НП). При этом образцы, вырезанные вдоль направления прокатки, составляли с направлением прокатки угол  $0^\circ$ , образцы, вырезанные поперек направления прокатки (ПН), –  $90^\circ$ . Температура хладноломкости оценивалась минимальной температурой, при которой все образцы выдерживали изгиб на  $90^\circ$  без разрушения.

Химический состав (мас. %) молибденовых сплавов

Сплав	Zr	If	Re	Al	Ni	B	C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
ЦМ-10	–	–	–	0,007	–	0,002	0,003	0,002	0,005
МИ-5	–	–	4,5	–	–	0,002	0,003	0,002	0,0004
ЦМ-6	0,01	–	–	–	–	0,002	0,003	0,002	0,005
ЦМ-12	0,12	0,15	–	–	0,04	0,002	0,003	0,002	0,0006

На рис. 1 показано изменение предела текучести и модуля упругости листовых молибденовых сплавов в зависимости от ориентации продольной оси образца относительно направления прокатки исходного листа. Для всех молибденовых сплавов четко прослеживается анизотропия прочностных и упругих свойств в плоскости листа. При этом максимальные значения предела текучести получены для образцов, вырезанных в поперечном направлении, минимальные – для образцов, вырезанных под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки. Наибольшие значения модуля упругости соответствуют образцам, вырезанным под углом  $45^\circ$ .

Если оценивать анизотропность листовых молибденовых сплавов по коэффициенту анизотропии, определенному как отношение максимального значения предела текучести к его минимальному значению, то их можно расположить в следующем порядке: ЦМ-10, ЦМ-6, ЦМ-12, МИ-5 (коэффициент анизотропии составляет 1,37; 1,28; 1,13; 1,07 соответственно). Как следует из этих данных, среди молибденовых сплавов наибольшей анизотропией предела прочности обладает наименее легированный сплав ЦМ-10. С увеличением в сплаве содержания легирующих элементов коэффициент анизотропии прочностных характеристик снижается. Молибденовый сплав МИ-5, содержащий 4,5% Re, даже после прокатки с суммарной степенью пластической деформации 88%, практически остается изотропным. По-видимому, различие в степени анизотропности молибденовых сплавов следует искать в количественном соотношении компонент кристаллографической текстуры деформации. Так, в сплаве ЦМ-10 в деформированном состоянии основными компонентами текстуры являются компоненты (001) [110], (112) [110] и (111) [110], [112], причем преобладает первая компонента. С увеличением содержания в сплаве легирующих элементов циркония, гафния и рения плотность текстурной компоненты (001) [110] снижается. В сплаве МИ-5 преобладает компонента кристаллографической текстуры (111) [110].

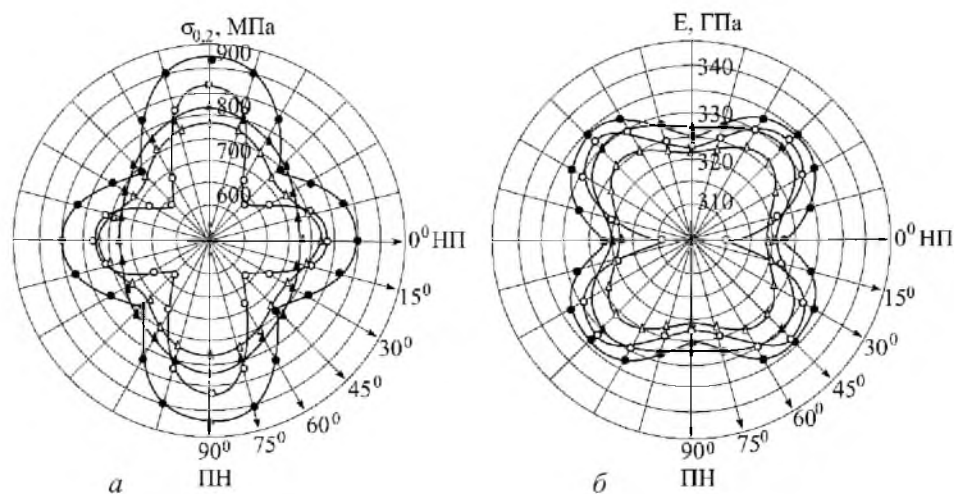


Рис. 1. Кривые анизотропии предела текучести (а) и модуля упругости (б) листовых молибденовых сплавов ЦМ-10 (○), ЦМ-6 (●), МИ-5 (△), ЦМ-12 (▲).

На рис. 2 представлено изменение относительного удлинения и температуры хладноломкости молибденовых сплавов в зависимости от ориентации продольной оси образца относительно направления прокатки. Как и в предыдущем случае, указанные характеристики обнаруживают четкую ориентационную зависимость. Следует, однако, отметить, что в зависимости от степени легирования молибдена характер изменения пластических характеристик с ростом угла ориентации продольной оси образца относительно направления прокатки не постоянен, как это наблюдалось для предела текучести и модуля упругости. Для легированного цирконием сплава ЦМ-6 максимальное значение относительного удлинения и минимальная величина температуры хладноломкости соответствуют образцом, вырезанным в продольном направлении, а наиболее хрупкими являются образцы, вырезанные под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки. При этом относительное удлинение для данных образцов составляет 32% и 0, а температура хладноломкости –  $55$  и  $120^\circ\text{C}$  соответственно. Образцы сплава ЦМ-12, вырезанные в продольном направлении, остаются наиболее пластичными, минимальные значения характеристик пластичности соответствуют образцам, вырезанным поперек прокатки. И наконец, сплав МИ-5 остается практически изотропным по характеристике температуры хладноломкости, относительное удлинение достигает 62% для образцов, вырезанных под углом  $45^\circ$ .

Представленные на рис. 1, 2 данные свидетельствуют, что деформированные в процессе прокатки листы молибденовых сплавов обладают четко выраженной анизотропией механических свойств. Для определения адекватной характеристики поведения конструкции из молибденовых сплавов в условиях реально действующих напряжений необходимо располагать полной картиной ориентационной зависимости механических характеристик в плоскости листа. При построении кривой ориентационной зависимости предела текучести следует проводить многочисленные испытания, что является трудоемким и длительным процессом. Поэтому авторами предпринята

попытка установить зависимость механических характеристик от ориентации продольной оси образца в плоскости листа относительно направления прокатки с помощью расчетного метода.

Из вышеприведенных данных (рис. 1, 2) видно, что листы молибденовых сплавов в плоскости прокатки – это ортогонально анизотропные материалы. Линии пересечения плоскостей симметрии являются осями симметрии второго порядка: поворот фигуры на половину окружности вокруг такой оси приводит к полному совмещению всех ее точек. В этом случае для описания одним уравнением всей кривой анизотропии предела текучести необходимо использовать феноменологический подход, согласно которому совместно рассматриваются предельные состояния, имеющие различную физическую природу. При феноменологическом подходе напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$ , действующие по опасной площадке образца, рассматриваются совместно, а не каждое в отдельности.

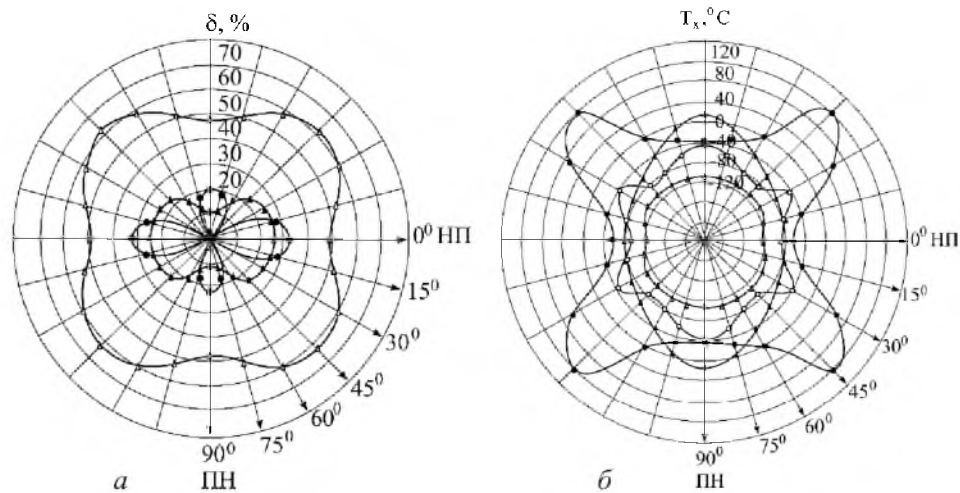


Рис. 2. Кривые анизотропии относительного удлинения (а) и температуры хладноломкости (б) молибденовых сплавов ЦМ-10 (○), ЦМ-6 (●), МИ-5 (△), ЦМ-12 (▲).

Феноменологический критерий прочности не должен содержать никаких ограничений относительно механизма разрушения или характера предельного состояния. Для анизотропных тел с использованием указанного подхода появляется возможность применения общего условия прочности для материалов, разных по составу и технологии получения, но одинаковых по симметрии свойств, а также для материалов со значительной анизотропией, для которых одно и то же напряженное состояние может привести к разным по физической природе предельным состояниям, если изменяются знаки напряжений или их ориентация. Аппроксимирующий полином при этом подбирается в такой форме, чтобы его можно было представить в виде совместного инварианта тензора напряжений и некоторого тензора, содержащего характеристики прочности материала.

Наиболее общая формулировка феноменологического критерия прочности анизотропных тел предложена в виде полиномов от компонент тензора напряжений [1, 2]. В работе [3] получен инвариантный критерий,

основанный на феноменологическом подходе к явлению разрушения и позволяющий при одноосном напряженном состоянии удовлетворительно описать закономерности изменения предельного напряжения в зависимости от ориентации вектора напряжений в анизотропном материале.

В сокращенной тензорной записи полиномиальный критерий четвертой степени имеет следующий вид:

$$a_{iklm}\sigma_{ik}\sigma_{lm} - \left[ \frac{(\sigma_{ik}\delta_{ik})^2 \sigma_{ik}\sigma_{lm}}{2} \right]^{1/2} = 0. \quad (1)$$

В развернутой форме для плоского напряженного состояния в плоскости  $XOY$  (плоскости деформированного прокаткой молибденового листа) полиномиальный критерий принимает вид:

$$\begin{aligned} & a_{1111}^2\sigma_{11}^4 + a_{2222}^2\sigma_{22}^4 + 16a_{1212}^2\sigma_{12}^4 + 2a_{1111}a_{2222}\sigma_{11}^2\sigma_{22}^2 + 4a_{1122}\sigma_{11}^2\sigma_{22}^2 + \\ & + 4a_{1111}a_{1122}\sigma_{11}^3\sigma_{22} + 4a_{1122}a_{2222}\sigma_{11}\sigma_{22}^3 + 8a_{1111}a_{1212}\sigma_{11}^2\sigma_{22}^2 + \\ & + 8a_{2222}a_{1212}\sigma_{22}^2\sigma_{12}^2 + 16a_{1122}a_{1212}\sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{12}^2 - \sigma_{11}^2 - \sigma_{22}^2 - \sigma_{12}\sigma_{22} = 0. \quad (2) \end{aligned}$$

При одноосном растяжении вдоль направления прокатки  $\sigma_{11} = \sigma_x$  – предел прочности или предел текучести вдоль оси  $X$ , все остальные составляющие напряжения будут равны нулю, т.е.  $\sigma_{22} = \sigma_{12} = 0$ . Подставив  $\sigma_{11} = \sigma_x$  и  $\sigma_{22} = \sigma_{12} = 0$  в (2), получим

$$a_{1111} = \frac{1}{\sigma_{\text{вх}}}. \quad (3)$$

Аналогично выясняется смысл остальных коэффициентов. Все компоненты с четырьмя одинаковыми значками относятся к одноосному растяжению:

$$a_{iiii} = \frac{1}{\sigma_{\text{vi}}}. \quad (4)$$

Таким образом, для плоского напряженного состояния также легко выясняется физический смысл компонент  $a_{ikik}$ , для которых

$$a_{ikik} = \frac{1}{\tau_{\text{vik}}}, \quad (5)$$

где  $\tau_{\text{vik}}$  – предел прочности при чистом сдвиге, когда между осями симметрии  $i$  и  $k$  происходит изменение прямого угла.

Компоненты тензора прочности  $a_{ikik}$  не имеют ясной физической интерпретации, поэтому обозначаются условно  $S_{ik}$  с двумя индексами, соответствующими плоскости симметрии, для которой они определяются.

Таким образом, для плоского напряженного состояния в одной из плоскостей симметрии  $i$  и  $k$  ортогонального анизотропного материала уравнение поверхности прочности в форме полиномиального критерия четвертой степени принимает следующий вид:

$$\left[ \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{vi}^2} + \frac{\sigma_k^2}{\sigma_{vk}^2} + \frac{\tau_{ik}^2}{\tau_{vik}^2} + \sigma_i \sigma_k S_{ik} \right]^2 - \sigma_i^2 - \sigma_k^2 - \sigma_{ik}^2 - \tau_{ik}^2 = 0, \quad (6)$$

где  $\sigma_i$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_{ik}$  – напряжения, действующие по площадкам симметрии материала, перпендикулярным к осям симметрии  $i$  и  $k$ ;  $\sigma_{vi}$ ,  $\sigma_{vk}$ ,  $\tau_{vik}$  – пределы прочности материала.

Если положить  $i = x$ ,  $k = y$  для одноосного растяжения образцов, различно ориентированных в плоскости  $XOY$ , то получим уравнение, описывающее зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от ориентации продольной оси образца относительно направления прокатки.

Величины  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$  выразим через  $\sigma_{0,2}$  и после подстановки в полиномиальный критерий получим

$$\frac{1}{\sigma_{0,2}^2} = \frac{\cos^4 \alpha}{\sigma_{0,2x}^2} + \frac{\sin^4 \alpha}{\sigma_{0,2y}^2} + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \left( \frac{4}{\sigma_{0,2xy}^2} - \frac{1}{\sigma_{0,2x}^2} - \frac{1}{\sigma_{0,2y}^2} \right). \quad (7)$$

Если положить  $\sigma_{0,2x} = \sigma_{0,2}^0$ ,  $\sigma_{0,2y} = \sigma_{0,2}^{90}$ ,  $\sigma_{0,2xy} = \sigma_{0,2}^{45}$ , то формулу (7) можно преобразовать в виде, более удобном для расчетов:

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}^0} = \frac{1}{\cos^4 \alpha + b \sin^2 2\alpha + c \sin^4 \alpha}, \quad (8)$$

где

$$b = \frac{\sigma_{0,2}^0}{\sigma_{0,2}^{45}} - \frac{1+c}{4}; \quad c = \frac{\sigma_{0,2}^0}{\sigma_{0,2}^{90}}.$$

На рис. 3,а представлена ориентационная зависимость предела текучести образцов молибденового сплава ЦМ-10, различно ориентированных в плоскости листа. Там же нанесены точки, полученные путем расчета по формуле (8). Видно, что формула (8), называемая “тензориальной”, хорошо описывает всю кривую изменения относительного предела текучести  $\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2}^0$  в зависимости от ориентации продольной оси образца относительно направления прокатки исходного молибденового сплава.

Деформированные прокаткой молибденовые сплавы имеют четко выраженную кристаллографическую текстуру [4], основными компонентами которой являются компоненты (001) [110], (112) [110] и (111) [uvw]. Поэтому естественно связать анизотропию прочностных и упругих характеристик с

кристаллографической ориентировкой зеренной структуры этих материалов. Такая связь обусловлена также ориентационной зависимостью упругих и прочностных характеристик для монокристаллов молибдена.

Для монокристаллов молибдена в общем случае ориентационная зависимость модуля упругости  $E$  может быть выражена следующим образом [5]:

$$\frac{1}{E} = \frac{C_{11} + C_{12}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})} - \frac{1}{4}A(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2), \quad (9)$$

где  $C_{ij}$  – упругие постоянные; их значения для молибдена получены в работе [6]:  $C_{11} = 4,661 \cdot 10^{-2}$  ГПа;  $C_{12} = 1,626 \cdot 10^{-2}$  ГПа и  $C_{44} = 41,095 \cdot 10^{-2}$  ГПа;  $A$  – анизотропный фактор Зинера,

$$A = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}} - 1. \quad (10)$$

В действительности каждой кристаллографической плоскости ( $hkl$ ) кубического кристалла однозначно соответствует ряд Фурье разложения функции анизотропии  $\Psi$ . Поэтому метод оценки влияния текстурных составляющих на анизотропию упругих и прочностных характеристик основан на сравнении разложения в ряд Фурье экспериментальной зависимости  $1/E = f(\varphi)$  и функции  $\Psi = f(\varphi)$  для идеальных ориентировок, найденных из полюсных фигур.

При этом угол  $\varphi$  для функции анизотропии  $\Psi$  отсчитывается от направления  $[k\ h\ 0]$  монокристалла.

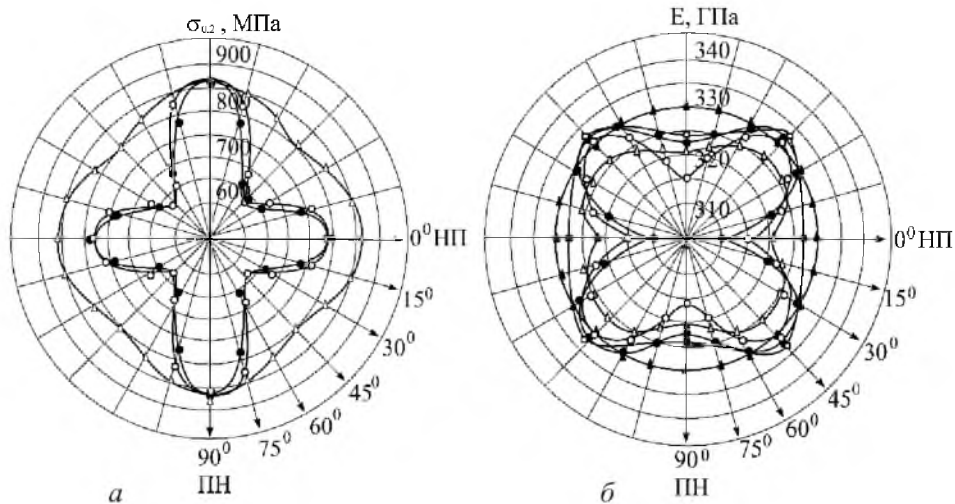


Рис. 3. Ориентационная зависимость предела текучести (а) и модуля упругости (б) молибденового сплава ЦМ-10 в плоскости листа. (а: ○ – экспериментальные данные; ● – расчет по тензорному критерию; △ – расчет по кристаллографической текстуре; б: ● – экспериментальные данные; ○ – расчет для текстуры типа (001) [110]; ▲ – то же, (111) [uvw]; △ – то же, (001) [210]; □ – то же, (112) [110].)

В деформированном прокаткой молибденовом сплаве плоскости  $(hkl)$  располагаются симметрично относительно кристаллографического направления, совпадающего с направлением прокатки. Поскольку экспериментальные кривые  $1/E = f(\varphi)$  получены в условиях отсчета угла  $\varphi$  от НП, при анализе текстуры молибденовых листов расчетные ряды  $\Psi = f(\varphi)$  для плоскостей  $(hkl)$  были преобразованы для новых направлений, совпадающих с направлением прокатки. Заметим также, что непосредственное сравнение рядов Фурье экспериментальной зависимости  $1/E = f(\varphi)$  с функцией  $\Psi = f(\varphi)$  может привести к некоторой неточности при интерпретации текстуры. Чтобы из всех ориентировок, определенных из полюсных фигур, выбрать те, которые могут быть ответственными за реальную анизотропию упругих свойств молибденового листа, следует сравнивать экспериментальные ряды для функций  $1/E = f(\varphi)$  с теоретическими рядами  $\Psi$  для различных идеальных ориентировок. На вид функции анизотропии будет влиять рассеяние текстуры, которая, в свою очередь, сильно влияет на абсолютные значения амплитуд гармоник разложения в ряд функции  $1/E = f(\varphi)$ . Однако отношение амплитуд гармоник при этом изменяется несущественно. Поэтому при оценке вклада в общую анизотропию упругих свойств отдельных ориентировок анализировались не абсолютные значения амплитуд гармоник, а их отношения.

Оценка модуля упругости по текстурным компонентам (рис. 3,б) показала, что текстурная компонента (111)  $[uvw]$  является изотропной и не может быть ответственной за уровень анизотропии материала. Действительно, сплав МИ-5, для которого преимущественной компонентой текстуры есть компонента (111)  $[110]$  и  $[112]$ , является изотропным относительно модуля упругости. В то же время текстурные компоненты типа (001)  $[110]$ , (001)  $[210]$  и (112)  $[110]$  обнаруживают заметную ориентационную зависимость модуля упругости (рис. 3,б). При этом оцениваемый по текстурным составляющим характер ориентационной зависимости модуля упругости, определенный экспериментально для различных молибденовых сплавов, одинаков. Следовательно, анизотропия модуля упругости деформированных прокаткой молибденовых листов обусловлена в основном наличием в последних четко выраженной кристаллографической текстуры.

Что касается предела текучести (рис. 3,а), то в этом случае вклад кристаллографической текстуры в анизотропию этой характеристики не столь значителен. Скорее всего, анизотропия прочностных характеристик в первую очередь обусловлена не кристаллографической, а структурной текстурой, т.е. существенной вытянутостью зерен в направлении прокатки и сильной сплюснутостью в нормальном направлении.

## Выводы

1. Молибденовые сплавы в деформированном состоянии обладают четко выраженной анизотропией механических характеристик в плоскости листа.
2. Предложен тензорный критерий, позволяющий с достаточной степенью точности описать полную кривую анизотропии предела текучести и модуля упругости в плоскости листа.



3. Анализ кристаллографической текстуры позволяет рассчитать анизотропию модуля упругости. Для описания анизотропии прочностных характеристик он не может быть использован с достаточной точностью.

## Резюме

Листові молибденові сплави в деформованому стані мають чітко виражену анизотропію механічних характеристик. Анизотропія пружних, міцнісних та пластичних характеристик зумовлена кристаллографічною і структурною текстурами, що сформовані в сплавах у процесі прокатки. Максимальні значення границі текучості, незалежно від хімічного складу молибденового сплаву, отримано для зразків, вирізаних поперек до напрямку прокатки. Що стосується характеристик пластичності, то в цьому випадку не спостерігається певної залежності. Для одних сплавів максимальні значення відносного подовження отримано на зразках, вирізаних вздовж прокатки, для інших – під кутом  $45^\circ$  до напрямку прокатки. Запропоновано тензоріальний критерій, що дозволяє описати повну криву характеристик міцності або пружності в площині листа. Опис кривої анизотропії границі текучості з використанням текстурного аналізу не призвів до позитивного результату, в той час як характер зміни модуля пружності можна з достатньою точністю описати за допомогою цього аналізу.

1. Ву Э. М. Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред // Механика композиционных материалов. – М.: Мир, 1978. – Т. 2. – 563 с.
2. Малмейстер А. К. Геометрия теории прочности // Механика полимеров. – 1966. – № 4. – С. 519 – 527.
3. Ашкенази Е. К. К вопросу о геометрии теории прочности // Там же. – 1967. – № 4. – С. 703 – 707.
4. Задерий Б. А., Котенко С. С., Маринченко А. Е. и др. Формирование кристаллографической текстуры сварных соединений молибденовых сплавов // Автомат. сварка. – 2002. – № 11. – С. 24 – 28.
5. Трефилов В. И., Мильман Ю. В., Иващенко Р. К. и др. Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена / Под общ. ред. В. И. Трефилова. – Киев.: Наук. думка, 1983. – 232 с.
6. Davidson D. L. and Brotzen F. R. Elastic constants of molybdenum rich-rhenium alloys in the temperature range – 190 to 100°C // J. Appl. Phys. – 1968. – 39, No. 12. – P. 5768 – 5775.

Поступила 19. 12. 2003