

Н. А. НЕДУМОВ, О. К. БЕЛОУСОВ, Н. Н. ШЛЕНКОВ

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОНИКЕЛИДА ТИТАНА

(Представлено академиком И. В. Тананаяевым 23 X 1975)

Необычное поведение свойств мононикелида титана и, в частности, его эффект «памяти» формы связаны с общей проблемой влияния прикладываемых напряжений на протекание мартенситного превращения. При этом точка начала превращения M_s и другие критические точки могут быть изменены воздействием внешних напряжений ⁽¹⁾.

Деформирование мононикелида титана в пределах псевдоупругой области, при температурах не выше M_d вызывает появление значительных тепловых эффектов. Такая деформация может также сильно изменять упругие свойства сплава. Резкая потеря упругой устойчивости сплава стехиометрического состава при охлаждении до 65°C (M_s) ⁽²⁾ означает также, что деформация сплава при этом облегчена, так как начавшийся процесс превращения решетки не требует больших напряжений для его развития.

Охлаждение TiNi и переход его через критическую область сопровождается экзотермическим эффектом. Деформация при одноосном растяжении сплава стехиометрического состава вызывает исчезновение некоторых интенсивных рефлексов, соответствующих отражениям основной решетки, в частности, отражениям (110) ($2\theta=48^\circ18'$) ⁽³⁾. Изменение теплосодержания при переходе, т. е. $(\Delta H_{100}-\Delta H_{25})$ составляет ~ 822 кал/г-ат.

Псевдоупругое поведение TiNi (или другое название — сверхэластичность) состоит в том, что на некоторой стадии упругой деформации наблюдается значительное пластическое течение, но при снятии нагрузки образец может возвратиться в исходное состояние (резиноподобная упругость). Если материал деформировать не выше температуры M_d , то при последующем нагреве он восстановит свою форму. При этом сплав может совершить работу против действия внешних сил.

Знание тепловых эффектов деформации и работы, которую может совершить образец, представляет важную задачу, и поэтому изучение процессов деформирования TiNi имеет научный и практический интерес.

Упругая и пластическая деформация сопровождается сближением и удалением межатомных связей в кристаллах, что соответствует экзотермическим и эндотермическим тепловым эффектам. Таким образом, данные по величине теплового эффекта и затраченной механической работы на деформацию позволяют рассчитать запасенную энергию, соответствующую возникновению сложных остаточных напряжений в структуре металла.

Из сплава, содержащего 50 ат. % Ti и 50 ат. % Ni , приготовленного плавкой в дуговой печи с нерасходуемым электродом, прокатывались образцы в форме полос $240 \times 10 \times 1$ мм, которые отжигались при 600° в течение 30 мин.

Тепловые эффекты упругой Q_u и пластической Q_p деформации определялись в условиях статического растягивающего нагружения с последующим снятием этого усилия в пределах от 80 до 300 кг при 18°C . Определение этих эффектов осуществлялось на основе измерения площадей пика S , ограниченного дифференциальными кривыми нагревания и охлаждения, записанными с объектом и без него (базовыми кривыми). Точ-

ность определения Q по S (0,5–5%) достигалась посредством компенсации и учета посторонних тепловых влияний и выполнения условий совместимости результатов воздействия на термочувствительные элементы тепловых излучений от объекта и эталонного источника, применяемого для калибровки. Пределы компенсации и совместимости для величин $K=Q/S$ кал/мм², $n=K/K_0$ и S (мм²) устанавливались по переменным: времени действия и мощности теплового эффекта, температуры, давления деформации, формы образца, термоприемника, эталонного источника

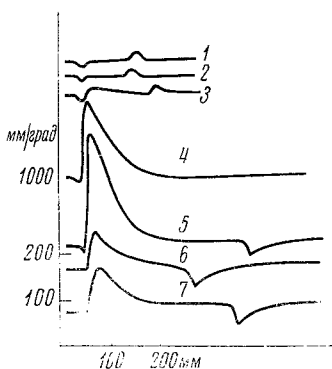


Рис. 1

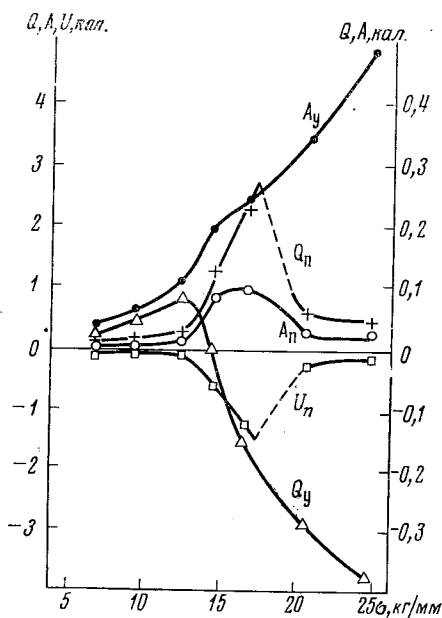


Рис. 2

Рис. 1. Дифференциальные кривые на-
гревания и охлаждения упругой и пла-
стической деформации монокнелида
титана. Номера кривых соответствуют
различным напряжениям (см. табл. 1)

Рис. 2. Зависимости тепловых эффек-
тов, запасенной энергии и механиче-
ской работы растягивающих усилий от
напряжения, относящиеся к упругой
(правая ось) и пластической (левая)
деформации монокнелида титана. $\sigma_B =$
 $= 80$ кг/мм²

Рис. 3. Дифрактограммы монокнелида
титана до (а) и после (б) деформиро-
вания. Излучение $\text{CuK}\alpha$. а — $\sigma = 0$; б —
 $\sigma = 24,69$ кг/мм²

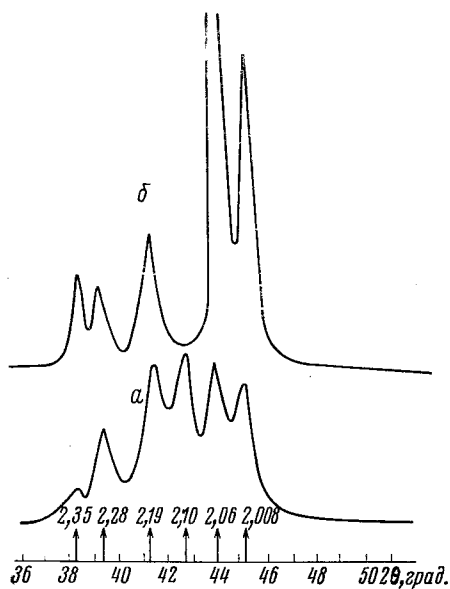


Рис. 3

и т. п. Чтобы указанные пределы и калибровочные характеристики были верны для всех объектов, воздействие тепловых излучений на термоприемники осуществлялось в среде постоянного состава с обратимыми свойствами (⁴⁻⁶). В связи с этим измерение величин тепловых эффектов упругой и пластической деформации выполнялось с помощью двух термоприемников, окружающих достаточно большую поверхность среднюю часть двух образцов длиной 100 мм. Один из двух образцов подвергался растягивающему статическому нагружению.

На рис. 1 представлено 7 кривых деформирования. Здесь отклонение по вертикальной оси на 1 м соответствует изменению температуры термодатчика на 1°C , а движение диаграммной ленты по горизонтальной оси составляло 10 мм в 1 мин. Численное значение $K=0,000135\text{ кал/мм}^2$. Предел совместимости по времени действия теплового эффекта составлял 22 сек. Интервал совместимости по величине теплового эффекта находился в пределах от 0,002 до 20 кал.

В табл. 1 приведены данные о распределении энергии, относящиеся к упругой и пластической деформации образца сечением $12,5\text{ мм}^2$.

Т а б л и ц а 1

№№ п.п.	Растяг. усилие P , кг	Напряжения σ , кг/мм ²	Тепловые эффекты		Механическая работа		Деформация		Запасенная энергия $U_{\text{зап}}=A-Q$
			Q_{Π}	Q_{y}	A_{Π}	A_{y}	ϵ_{Π}	ϵ_{y}	
1	80	6,5	0,006	0,028	0,002	0,029	0	0,156	-0,004
2	110	9,05	0,034	0,053	0,005	0,056	0,018	0,218	-0,03
3	150	12,35	0,2	0,076	0,100	0,106	0,285	0,303	-0,10
4	175	14,40	1,46	-0,002	0,757	0,194	1,85	0,474	-0,705
5	200	16,46	2,32	-0,15	0,967	0,247	2,06	0,527	-1,353
6	250	20,57	0,54	-0,28	0,246	0,344	0,421	0,588	-0,294
7	300	24,69	0,45	-0,37	0,25	0,493	0,356	0,702	-0,2

Результат воздействия теплового излучения на поверхность термодатчика регистрировался с площади образца равной 1920 мм^2 . Поправка на деформацию образца не превышала 2%.

В соответствии с данными рис. 1 форма кривых 1—3 упругой и пластической деформации ничем не отличается от поведения обычных металлов и сплавов.

Здесь упругая деформация при растяжении соответствует эндотермическому, а при снятии нагрузки — экзотермическому тепловым эффектам. Пластическая деформация сопровождается общим суммарным сокращением длины межатомных связей в результате их разрыва в локальных участках и последующему перераспределению, что приводит к экзотермическому тепловому эффекту (рис. 1). С ростом напряжения до $14,4\text{ кг/мм}^2$ наблюдается значительное увеличение теплового эффекта пластической деформации и затем резкий спад, относящийся к упругой деформации при снятии нагрузки. При дальнейшем увеличении усилия тепловой эффект пластической деформации достигает максимального значения $2,32\text{ кал}$ при $\sigma=16,46\text{ кг/мм}^2$, а экзотермический тепловой эффект упругой деформации при снятии нагрузки изменился на эндотермический. С этого момента по направленности тепловых эффектов упругая деформация приняла обратный характер, подобный свойствам резины. Дальнейшее увеличение нагрузки до $24,69\text{ кг/мм}^2$ сопровождается уменьшением теплового эффекта пластической деформации и увеличением эндотермического эффекта упругой деформации при снятии усилия.

Полученные данные распределения энергии приведены в табл. 1, а их зависимости от напряжения представлены на рис. 2.

Рентгеновский анализ (рис. 3) образцов, не подвергавшихся деформированию, и образцов после деформирования при нагрузке $24,69\text{ кг/мм}^2$ указывает на то, что процесс мартенситного превращения углубляется: интенсивность линий, соответствующих мартенситу ($2\theta=43-46^{\circ}$), увеличивается.

Из распределения энергии (табл. 1, рис. 1) следует, что тепловой эффект пластической деформации в области перехода с максимальным значением эффекта $Q=+2,32\text{ кал}$ при напряжении $16,46\text{ кг/мм}^2$ значительно превосходит тепловой эффект всей затраченной на деформацию работы

внешних сил. Эта разность соответствует метастабильному состоянию сплава.

Расчет величины тепловых эффектов, соответствующих сложному внутреннему состоянию сплава, дает указание на величину работы, которая может совершаться образцом при восстановлении его формы.

Таким образом, пользуясь разработанным методом, можно по данным распределения энергии проследить последовательность протекающих процессов, предшествующих разрушению различных эксплуатационных изделий.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
13 X 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. Кауфман, М. Козн, В сб.: Успехи физики металлов, т. 4, 1961, стр. 192.
² И. И. Корнилов, Е. В. Качур, О. К. Белоусов, Физ. мет. и металловед., т. 32, в. 2, 420 (1971). ³ R. G. de Lange, J. A. Zijdeveld, J. Appl. Phys., v. 39, № 5, 2195 (1968).
⁴ Н. А. Недумов, В. Б. Вессонов, В. А. Ефимов, Тр. IV конфер. по слитку, М., «Металлургия», 1969, стр. 25. ⁵ N. A. Nedumov, Differential Thermal Analysis, v. 1, Ch. 6, London, 1970, p. 161. ⁶ Н. А. Недумов, Тр. V Всесоюзн. совещ. по термическому анализу, М., «Наука», 1973, стр. 45.