Р.М. Кашаев, Р.Я. Лутфуллин, М.И. Нагимов

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА TI-6AL-4V

Приведены результаты испытаний при температурах 650-800 °C и при скоростях деформации $1\cdot10^4-2\cdot10^{-1}$ с⁻¹ на одноосное растяжение образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, вырезанных вдоль и поперек направления прокатки листа. Выявлена низкотемпературная сверхпластичность исследованных листов титанового сплава Ti-6Al-4V. Показано, что максимальную пластичность листы проявили при температурах 750 и 800 °C. В допустимых пределах разброса эксперимента листы являются изотропными в продольном и поперечном направлениях относительно напряжения течения и пластичности в исследованном температурно-скоростном диапазоне.

Ключевые слова: низкотемпературная сверхпластичность, титановый сплав Ti-6Al-4V, растяжение.

Известно [1–3], что промышленные титановые листы типа ВТ6 (аналог Ti-6Al-4V) широко применяют при изготовлении различных изделий методом сверхпластической деформации. Этот сплав широко исследован при различных температурно-скоростных условиях. Он проявляет сверхпластические свойства при температурах 850–950°С и при скоростях деформации 1·10⁻⁴–1·10⁻²c⁻¹ [4]. Однако высокая температура сверхпластической деформации требует использования дорогостоящей жаропрочной оснастки и, кроме того, приводит к газонасыщению поверхностного слоя изделия. В последние годы ОАО ВСМПО начало выпускать листы из сплава Ti-6Al-4V с улучшенными сверхпластическими свойствами [5]. Однако данных по характеристикам сверхпластичности этих листов в литературе недостаточно.

Цель работы — выявление низкотемпературной сверхпластичности титановых листов толщиной 1 и 1,5 мм из сплава Ti-6Al-4V в условиях одноосного растяжения.

Объектом исследования являлись титановые листы из сплава Ti-6Al-4V толщиной 1 и 1,5 мм с улучшенными сверхпластическими свойствами производства ОАО ВСМПО. Химический состав и механические свойства листа толщиной 1 мм приведены соответственно в табл. 1, 2.

Химический состав, %

| | Al | V | Fe | С | 0 | N | Н | Y | Примеси | Ti |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|
| Bepx | 6,09 | 4,27 | 0,25 | 0,005 | 0,146 | 0,003 | 0,0006 | <0,001 | 0,081 | Осторо |
| Низ | 6,08 | 4,26 | 0,21 | 0,005 | 0,138 | 0,006 | 0,0008 | <0,001 | 0,081 | Основа |

Таблица 2

Механические свойства

| Направление вырезки образца | Условный предел текучести 0,20%, МПа | Предел прочности, МПа | Относительное удлинение, % |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Продольное | 1044 | 1105 | 9,1 |
| Поперечное | 1064 | 1122 | 9,9 |

На рис. 1 представлена фотография тонкой структуры сплава Ti-6Al-4V толщиной 1 мм, сделанная в просвечивающем электронном микроскопе JEM - 2000 EX. Средний размер зерен составляет 1,1 мкм.



Рис. 1. Тонкая структура листа из сплава Ti-6Al-4V толщиной 1 мм в просвечивающем электронном микроскопе

В процессе работы проводились эксперименты на растяжение. Из листового материала толщиной 1,0 и 1,5 мм изготавливались плоские образцы с продольным и поперечным направлением прокатки листового материала. Ширина рабочей части образца 5 мм, длина рабочей части 20 мм. Механические испытания на растяжение проводились на машине INSTRON 1185 при температурах 650, 700, 750 и 800 °C и при скоростях деформирования 0,5, 5 и 50 мм/мин. Всего было испытано 48 образцов.

По результатам испытаний была определена пластичность образцов по формуле

$$\delta = ((l_k - l_0) / l_0) 100 \%,$$

где $l_0 = 20$ мм — начальная длина рабочей части образца, l_k — конечная длина рабочей части образца.

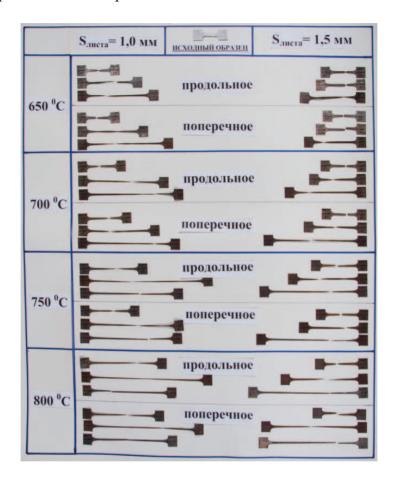


Рис. 2. Сравнительный вид исходного и испытанных образцов

Истинные напряжения течения определяли по формуле

$$\sigma = P / F$$
.

где P — сопротивление деформации, H, F — текущая площадь поперечного сечения образца, которую определяли из условия постоянства объема рабочей части образца.

Одной из основных характеристик сверхпластичности является коэффициент скоростной чувствительности материала m [6]. Коэффициент m определяли методом ступенчатого переключения скоростей деформирования в начале испытания каждого образца по формуле

$$m = ln(P_2/P_1) / ln(V_2/V_1),$$

где V_1 и V_2 – скорости деформирования до и после переключения; P_1 и P_2 – соответствующие им усилия деформирования.

Вид исходного и испытанных образцов представлены на рис. 2.

На рис. 3–6 представлены результаты механических испытаний, иллюстрирующие влияние температуры и скорости деформирования на проявление пластичности и сверхпластичности листового материала.

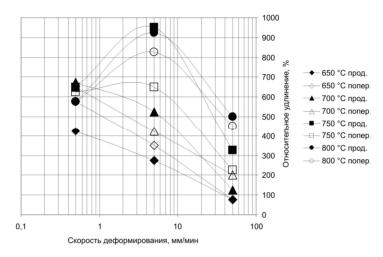


Рис. 3. Влияние скорости деформирования на пластичность образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1 мм сплава Ti-6Al-4V

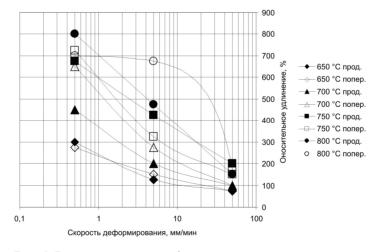


Рис. 4. Влияние скорости деформирования на пластичность образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1,5 мм сплава Ti-6Al-4V

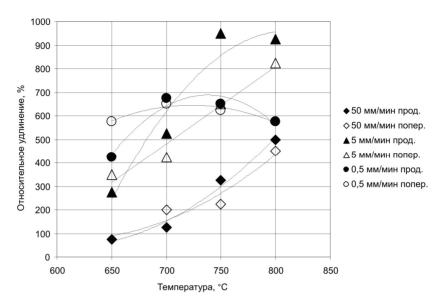


Рис. 5. Влияние температуры на пластичность образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толшиной 1 мм сплава Ti-6Al-4V

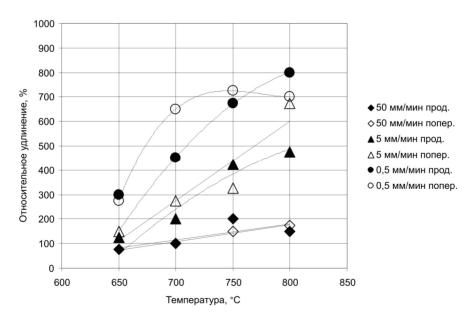


Рис. 6. Влияние температуры на пластичность образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1,5 мм сплава Ti6Al4V

Как показали результаты механических испытаний (см. рис. 2–6), пластичность листа толщиной 1мм выше пластичности листа толщиной 1,5 мм, причем направление вырезки образцов не оказывает существенного влияния на относительное удлинение. Пластичность листа толщиной 1,5 мм увеличивается с повышением температуры и с уменьшением скорости деформирования во всем диапазоне исследованных температур и скоростей деформирования. Такой же характер изменения пластичности имеет лист толщиной 1мм при испытаниях при температурах 650 и 700 °C. При температурах же 750 и 800 °C пластичность достигает максимума при скорости деформирования 5 мм/мин. Дальнейшее уменьшение скорости до 0,5 мм/мин приводит к снижению пластичности. Это, по всей видимости, связано с влиянием роста зерен и газонасыщением сплава.

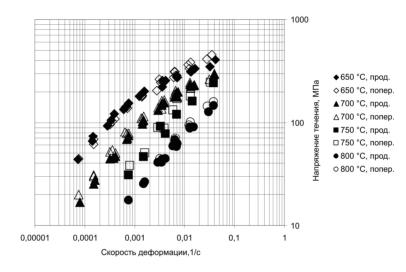


Рис. 7. Влияние скорости деформации и температуры на напряжение течения образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1мм сплава Ti-6Al-4V

На рис. 7 и 8 представлены зависимости напряжения течения и коэффициента скоростной чувствительности *т* листового материала толщиной 1 мм от скорости деформации. Напряжение течения сплава повышается с уменьшением температуры и с увеличением скорости деформации. Видно, что влияние направления вырезки образцов на напряжение течения листа незначительное и находится в рамках разброса экспериментальных данных. Это свидетельствует об изотропно-

сти напряжения течения в плоскости листа, что весьма благоприятно для сверхпластической формовки.

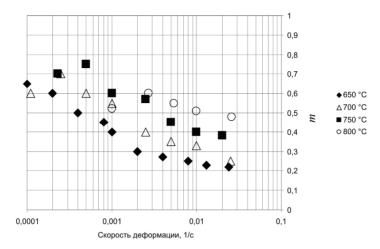


Рис. 8. Влияние скорости деформации и температуры на коэффициент скоростной чувствительности *m* листа толшиной 1 мм

Считается, что материал проявляет сверхпластические свойства, если m > 0,3 [6]. Для температуры 650 °C это условие выполняется при скоростях деформации $\xi < 2\cdot 10^{-3}$ с⁻¹, для 700 °C – $\xi < 1\cdot 10^{-2}$ с⁻¹. При температурах 750 °C и 800 °C материал проявляет высокоскоростную сверхпластичность (рис. 8).

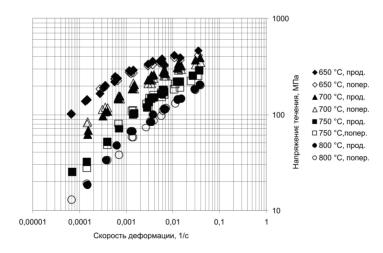


Рис. 9. Влияние скорости деформации и температуры на напряжение течения образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1,5 мм сплава Ti-6Al-4V

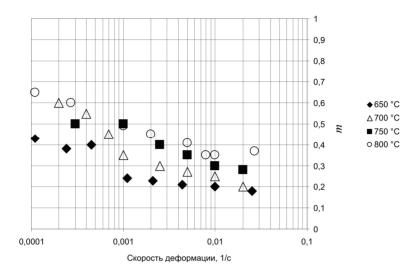


Рис. 10. Влияние скорости деформации и температуры на коэффициент скоростной чувствительности m листа толщиной 1,5 мм

Характер зависимостей напряжения течения и коэффициента m от скорости деформации для листа толщиной 1,5 мм аналогичен поведению материала листа толщиной 1 мм. Однако напряжение течения металла листа толщиной 1,5 мм выше, чем у листа толщиной 1 мм, а коэффициент m ниже. Влияние ориентации образцов относительно прокатки на напряжение течения и пластичность также не обнаружено. Напряжение течения образцов, вырезанных вдоль прокатки листа толщиной 1,5 мм в пределах разброса эксперимента, такое же, как и для образцов, вырезанных поперек прокатки. Лист толщиной 1,5 мм начинает проявлять сверхпластические свойства только с температуры 700 °C при скорости деформации $\xi < 2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$.

В результате выполненных работ установлено:

- 1. Максимальную пластичность образцы проявили при температурах 750 и 800 °C.
- 2. Для листа толщиной 1 мм пластичность растет с уменьшением скорости деформации при температурах 650 и 700 °C, а при температурах 700 и 750 °C пластичность имеет максимум при скорости деформирования 5 мм/мин; для листа толщиной 1,5 мм пластичность растет с уменьшением скорости деформации при всех испытанных температурах.

- 3. В пределах разброса эксперимента листы являются изотропными в плоскости листа относительно напряжения течения и пластичности в исследованном температурно-скоростном диапазоне.
- 4. В исследованных листах выявлена низкотемпературная сверх-пластичность при следующих температурно-скоростных условиях:

Для листа толщиной 1мм:

```
температура 650–700 °C, скорость деформации \xi < 2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}; температура 700–750 °C, скорость деформации \xi < 1 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}; температура 750–800 °C, скорость деформации 5 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} < \xi < 1 \cdot 10^{-1} \text{ c}^{-1}.
```

Для листа толщиной 1,5мм:

температура 700–750 °C, скорость деформации $\xi < 2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$; температура 750–800 °C, скорость деформации $\xi < 1 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$.

Библиографический список

- 1. Weisert E.D. and Stacher G.W. Fabricating Parts with SPF/DB Process // Metal Progress. 1977. No. 3. P. 33–37.
- 2. Stephen D. Superplastic Forming and Diffusion Bonding of Titanium // The Institute of Metals. London, 1986. P.108–125.
- 3. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.3. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов: моногр. М.: Наука, 2002.-438 с.
- 4. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов: моногр. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
- 5. Comley P.N. Lowering the heat the development of reduced SPF temperature titanium alloys for aircraft production // Mater. Sci. Forum 447–448. 2004. P. 233–238.
- 6. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов: моногр. М.: Металлургия, 1975. 280 с.

Получено 5.10.2010