

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 °С и при скоростях деформации $1 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-1}$ 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 °С. В допустимых пределах разброса эксперимента листы являются изотропными в продольном и поперечном направлениях относительно направления 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 $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ с⁻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.

Таблица 1

Химический состав, %

	Al	V	Fe	C	O	N	H	Y	Примеси	Ti
Верх	6,09	4,27	0,25	0,005	0,146	0,003	0,0006	<0,001	0,081	Основа
Низ	6,08	4,26	0,21	0,005	0,138	0,006	0,0008	<0,001	0,081	

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 °С 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.

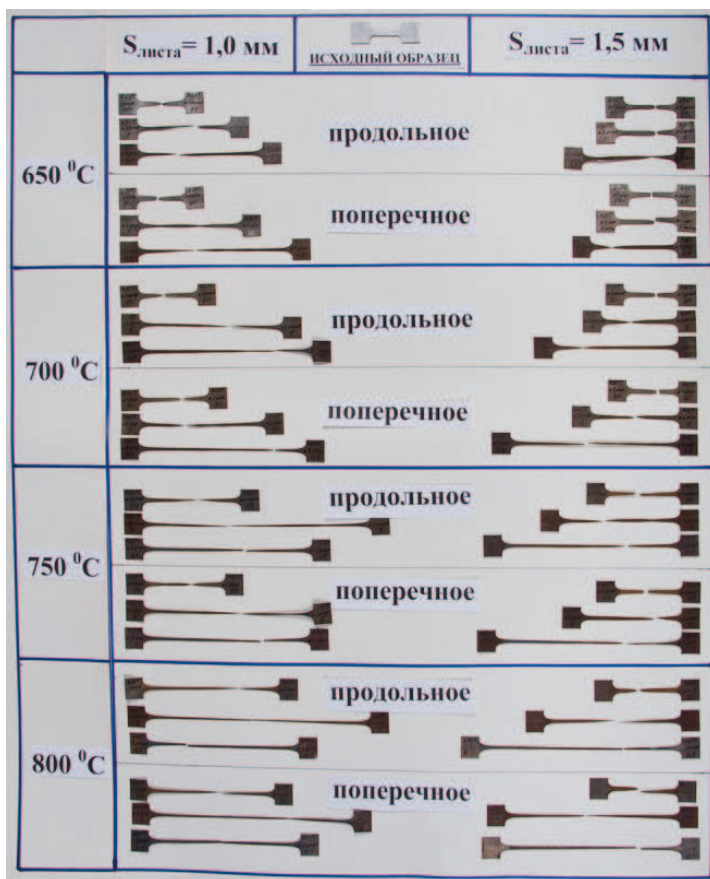


Рис. 2. Сравнительный вид исходного и испытанных образцов

Истинные напряжения течения определяли по формуле

$$\sigma = P / F,$$

где P – сопротивление деформации, Н, 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.

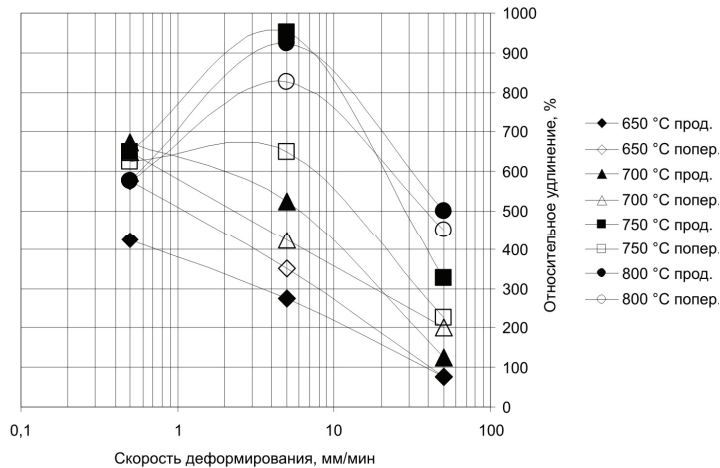


Рис. 3. Влияние скорости деформирования на пластичность образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1 мм сплава Ti-6Al-4V

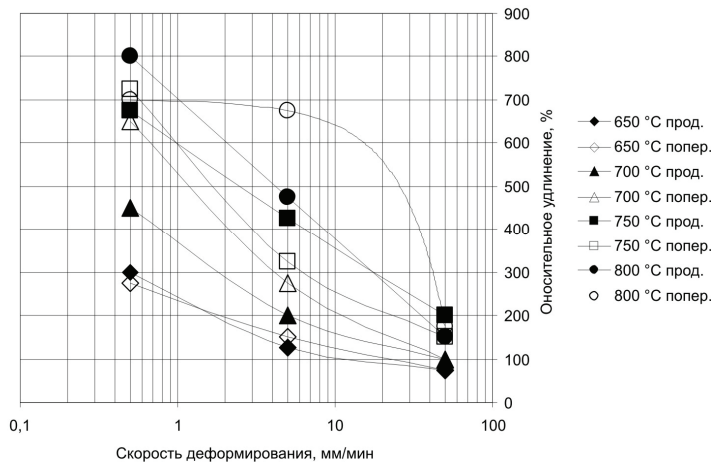


Рис. 4. Влияние скорости деформирования на пластичность образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1,5 мм сплава Ti-6Al-4V

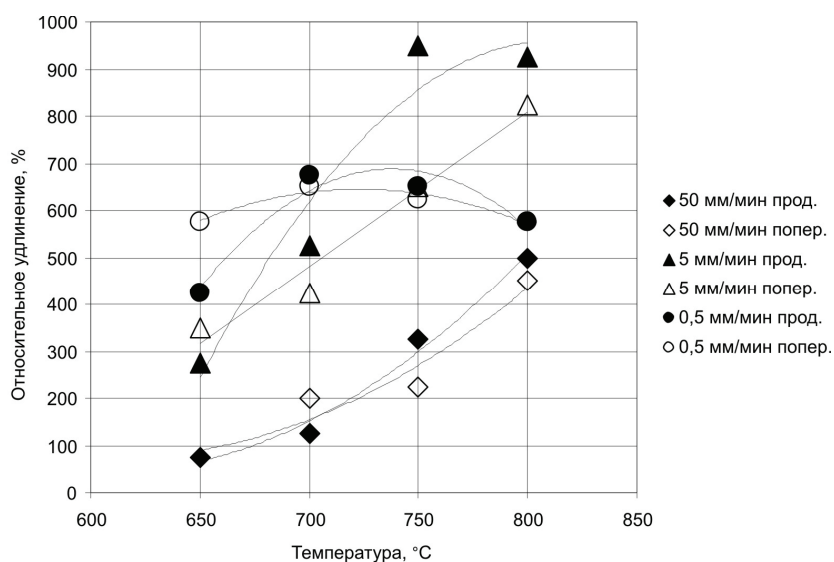


Рис. 5. Влияние температуры на пластичность образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1 мм сплава Ti-6Al-4V

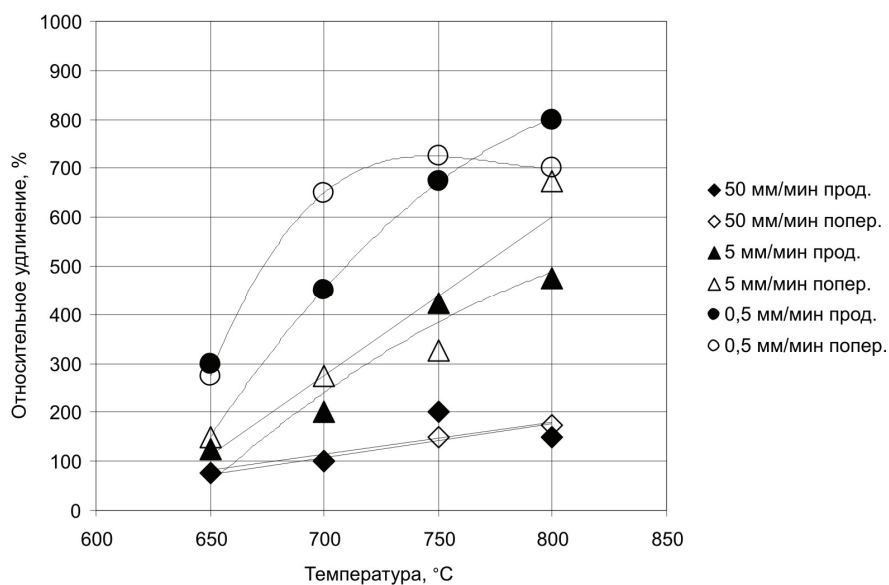


Рис. 6. Влияние температуры на пластичность образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1,5 мм сплава Ti6Al4V

Как показали результаты механических испытаний (см. рис. 2–6), пластичность листа толщиной 1 мм 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 1 мм при испытаниях при температурах 650 и 700 °С. При температурах же 750 и 800 °С 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.

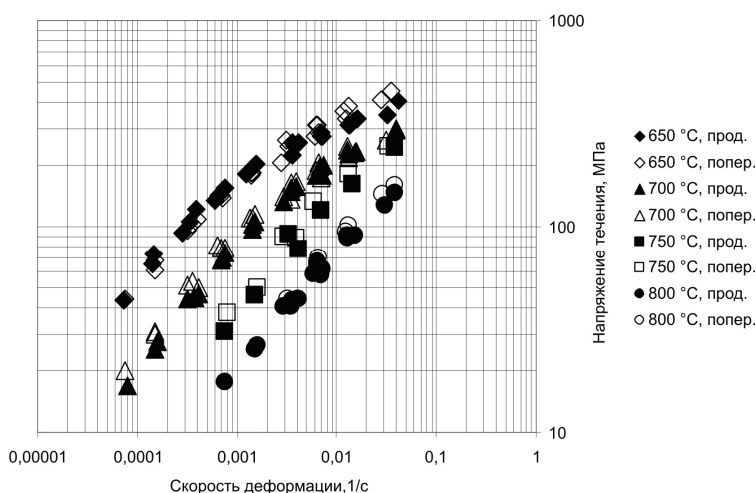


Рис. 7. Влияние скорости деформации и температуры на напряжение течения образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1 мм сплава Ti-6Al-4V

На рис. 7 и 8 представлены зависимости напряжения течения и коэффициента скоростной чувствительности m 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.

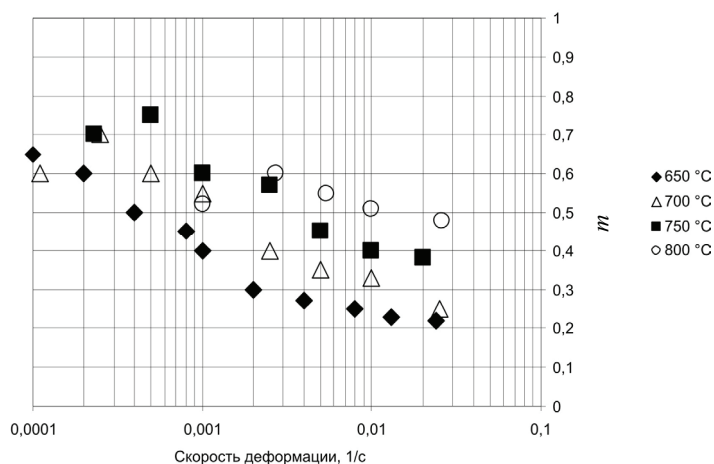


Рис. 8. Влияние скорости деформации и температуры на коэффициент скоростной чувствительности m листа толщиной 1 мм

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

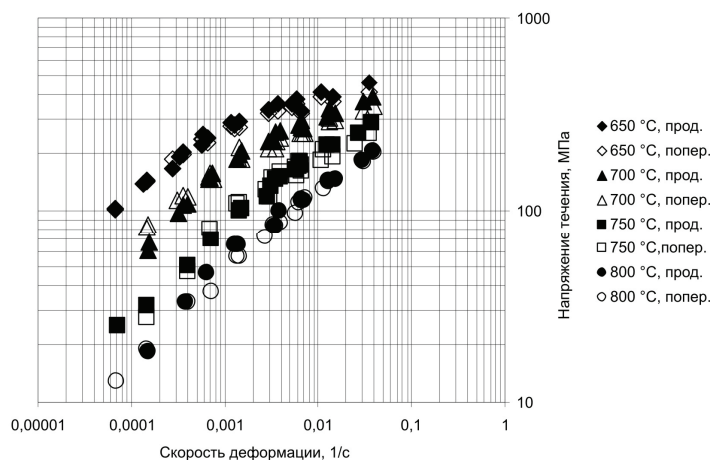


Рис. 9. Влияние скорости деформации и температуры на напряжение течения образцов, вырезанных вдоль (прод.) и поперек (попер.) прокатки из листа толщиной 1,5 мм сплава Ti-6Al-4V

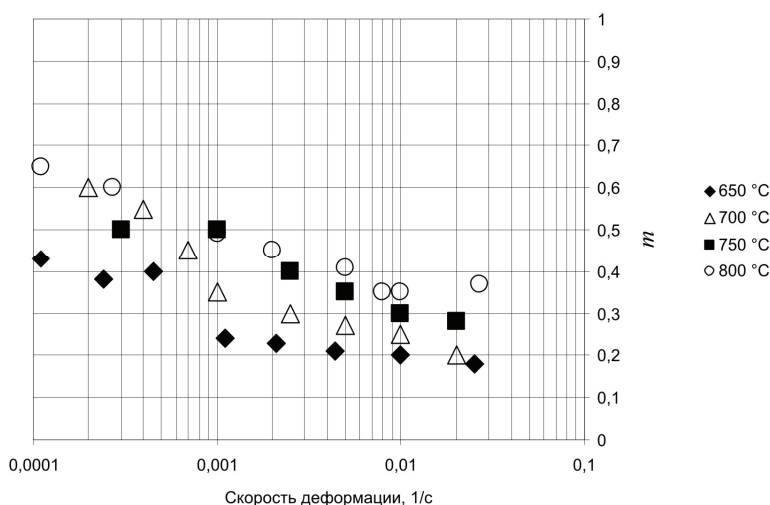


Рис. 10. Влияние скорости деформации и температуры на коэффициент скоростной чувствительности m листа толщиной 1,5 мм

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 $\dot{\epsilon} < 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

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 сверхпластичность при следующих температурно-скоростных условиях:

Для листа толщиной 1мм:

температура 650–700 °С, скорость деформации $\dot{\xi} < 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$;

температура 700–750 °С, скорость деформации $\dot{\xi} < 1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$;

температура 750–800 °С, скорость деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} < \dot{\xi} < 1 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Для листа толщиной 1,5мм:

температура 700–750 °С, скорость деформации $\dot{\xi} < 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$;

температура 750–800 °С, скорость деформации $\dot{\xi} < 1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

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.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов: моногр. – М.: Наука, 2002. – 438 с.

4. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов: моногр. – М.: Metallurgy, 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.: Metallurgy, 1975. – 280 с.

Получено 5.10.2010