

Формуемость наноструктурного листа титанового сплава VT6

Круглов А.А.[†], Руденко О.А.

[†]alweld@go.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 г. Уфа

Formability of VT6 titanium alloy nanostructured sheet

A.A. Kruglov, O.A Rudenko

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

Проведены исследования формуемости наноструктурного титанового сплава VT6 в интервале температур от 500 до 800°C. Установлено, что наноструктурное состояние сплава обеспечивает возможность получения изделий сверхпластической формовкой при температуре 550°C и выше. Показана возможность изготовления трехслойных полых конструкций при температуре 750°C, используя наноструктурный лист только в качестве заготовки наполнителя.

Ключевые слова: сверхпластическая формовка, титановый сплав, наноструктура.

Formability of nanostructured VT6 titanium alloy is investigated in the temperature range from 500 to 800°C. It is established that nanostructure of the alloy makes it possible to produce parts by means of superplastic forming at temperatures 550°C and higher. It is also demonstrated that three-layered hollow structures can be made at 750°C using the nanostructured material only for inner sheet.

Keywords: superplastic forming, titanium alloy, nanostructure.

1. Введение

Сверхпластическая формовка (СПФ) является одним из технологических процессов, в котором наиболее полно реализуются преимущества сверхпластической (СП) деформации [1,2]. Однако относительно высокие температуры обработки, особенно применительно к титановым сплавам, остаются нерешенной проблемой и сдерживают широкое промышленное использование СПФ.

Традиционными температурами для СПФ изделий из титанового сплава VT6 (Ti-6Al-4V), широко используемого в промышленности, являются температуры в интервале 850-925°C. При таких температурах на поверхности формуемой листовой заготовки образуется хрупкий альфированный слой, который необходимо удалять абразивной обработкой и (или) химическим травлением. Из-за высоких температур существенно снижается стойкость штампового инструмента [3].

Один из путей решения указанной проблемы состоит в разработке новых титановых сплавов, которые

могут проявлять СП свойства при пониженных температурах. Так, созданный японской компанией NKK Corporation сплав SP700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo) позволяет осуществлять СПФ при 700°C [4]. Другой путь заключается в уменьшении среднего размера зерен в промышленных сплавах, уже широко применяемых в технологии СПФ. Снижение температуры процесса в данном случае становится возможным за счет эффекта низкотемпературной сверхпластичности [5]. Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение по заказу компании Boeing Commercial Airplanes уже производит промышленный лист из титанового сплава 6Al-4V с размером зерен ~1 мкм, что позволяет снизить температуру формовки до 775°C [6], и по мнению автора, обеспечивает коммерческий успех технологии СПФ.

Прогресс, достигнутый в разработке методов получения наноструктурных (НС) листовых титановых полуфабрикатов [7] в ИПСМ РАН, открыл новые перспективы создания эффективных ресурсосберегающих технологий на основе метода СПФ.

Первые эксперименты по формуемости НС листов с размером зерен 500 нм, полученных по способу [8] были проведены в 1999 году. Круглые заготовки формовали в цилиндрическую полость диаметром 30 мм и глубиной 5, 10 и 15 мм при температуре 700°C и давлении газа до 4 МПа со средней скорости деформации 10^{-3} с^{-1} . Диапазон степеней деформации составил от 20 до 400% [9].

Следует отметить, что для листового материала важной технологической характеристикой служит формуемость – способность листовой заготовкой принимать требуемую форму. При этом важным является выбор формы оболочки. Исходя из условий СПФ, полусферическая форма представляется наиболее приемлемой. На стадии формообразования полусферы, независимо от геометрии формуемого изделия, происходит свободное выпучивание листовой заготовки под действием приложенного давления. Осесимметричное изделие до соприкосновения со стенками матрицы остается куполообразным. Начальная стадия, называемая свободной выдувкой, имеет решающее значение для всего процесса в целом, так как именно на этой стадии формируются основные условия, определяющие не только последующее формоизменение, но также количественные и качественные характеристики получаемых изделий.

Снижение среднего размера зерен до 200 нм в листах титанового сплава ВТ6 было достигнуто, разработкой способа [10], реализованного в ИПСМ РАН. Для данного сплава это считается пределом, который можно достигнуть в листе промышленных размеров. В этой связи было важно изучить формуемость таких листов, а также сопоставить их с листами, имеющими микрокристаллическую (МК) структуру.

2. Сверхпластическая формовка

Тестовые формовки полусфер выполняли из НС листов со средним размером зерен 200 нм и промышленных листов с МК структурой со средним размером зерен 3 мкм. Толщина листов 0,8 мм.

Для СПФ полусфер из исследуемого листа вырезали круглую заготовку диаметром 100 мм, которую собирали в пакет с вспомогательной заготовкой. К вспомогательной заготовке приваривали штуцер для подачи газа. Пакет герметизировали по периметру с помощью контактной шовной сварки. Перед СПФ пакет жестко фиксировали между крышкой и матрицей штампа. Формовку осуществляли путем подачи аргона во внутреннюю полость пакета. Использовали матрицу диаметром 70 мм и глубиной 35 мм. Продолжительность формообразования сферического купола радиусом $R = 35 \text{ мм}$ определяли с помощью сигнального элемента, срабатывающего от возникновения контакта между куполом и дном матрицы.

Результаты СПФ полусфер из листовых заготовок с различной структурой при температуре 700°C представлены в таблице 1 [11].

Из НС листа были получены полусферы с отношением высоты купола H к радиусу полусферы R , равным 1 (рис. 1, а) При этом не удалось отформовать полусферы из листовых заготовок с МК структурой с отношением $H/R = 1$ при тех же режимах формовки.

Таблица 1

Результаты СПФ полусфер при температуре 700°C.

№	Размер зерен, мкм	Давление, МПа	Время, мин.	Форма, H/R
1	0,200	2	23,3	1
2	0,200	3	14	1
3	0,200	5	5,5	1
6	2	3	90	0,7
7	2	5	23	разрыв

Из МК листа при давлении 3 МПа за 90 мин был получен только купол с отношением H/R , равным 0,7 (рис. 1, б), а при давлении 5 МПа в процессе формовки произошел разрыв заготовки (рис. 1, в). Результаты формовки показывают, что МК структура исчерпала свой ресурс пластичности.

Для дальнейшего исследования формуемости НС листов температурный интервал расширили. Температуру формовки снижали с шагом в 50°C, начиная с 800°C до минимально возможной температуры, при которой можно было получить полусферу с $R = 35 \text{ мм}$ при постоянном давлении газа. Зависимость времени формовки полусферы от температуры представлена на рис. 2. Полусферы с $R = 35 \text{ мм}$ были получены в интервале от 800°C до 550°C. При температуре 500°C только через 90 мин образовался купол высотой 16 мм.

Наличие альфированного слоя на поверхности отформованных полусфер оценивали по изменению ми-

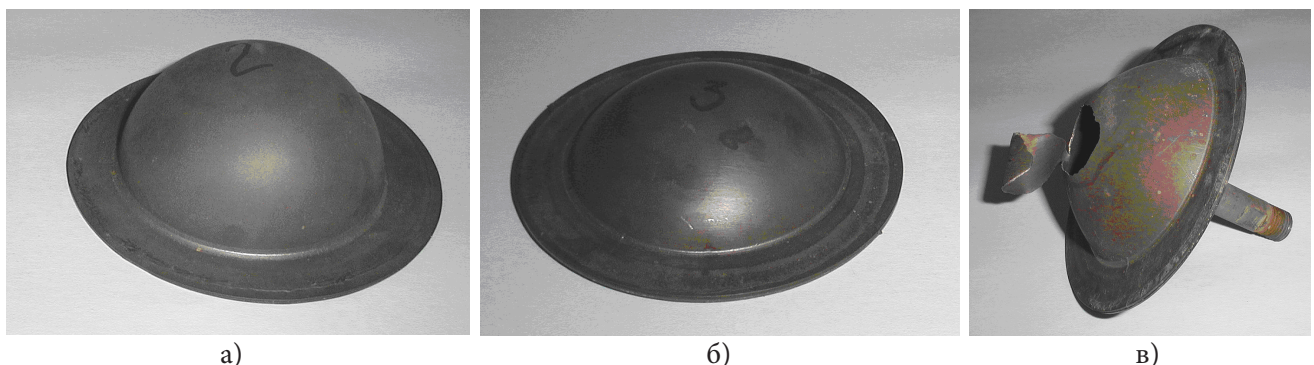


Рис. 1. Результаты формовки листов с НК (а) и МК структурой (б, в) при 700°C

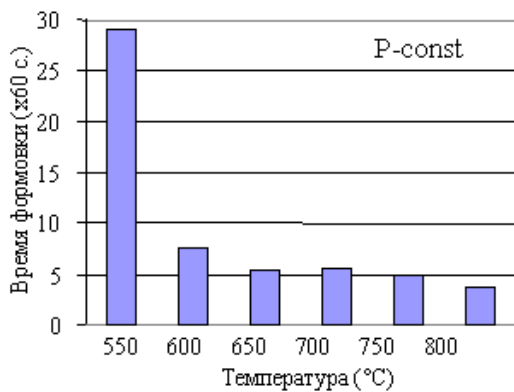


Рис. 2. Зависимость времени формовки полусферы ($R = 35$ мм) от температуры.

кротвердости. Результаты измерения микротвердости показали, что по сравнению с исходным состоянием поверхности заметное увеличение микротвердости начинается с температуры 750°C .

Особые физико-механические свойства, которыми обладают НС материалы, обусловлены размером зерен [12], поэтому важно не только осуществить СПФ и избежать образования альфированного слоя на поверхности изделия, но и по возможности сохранить соответствующую структуру в изделии. В работе [12] показано, что отжиг при температурах выше 650°C приводит к заметному росту зерен в НС титановом сплаве ВТ6.

Из исследуемых НС листов СПФ, используя также цилиндрическую матрицу, были получены оболочки цилиндрической формы диаметром 70 мм и высотой 35 мм при температурах 650°C и 600°C (рис. 3). Металлографический анализ образцов, вырезанных из донной части цилиндров, показал что после СПФ при 600°C размер зерен не превышает 1 мкм. Полученные данные показывают, что температура 600°C для НС листа с размером зерен 200 нм с учетом времени формообразования полусферы, шероховатости поверхности [13], размера зерен в изделии является оптимальной для СПФ.



Рис. 3. Цилиндрические оболочки, полученные при температурах 650°C (слева) и 600°C (справа).

3. Сварка давлением / Сверхпластическая формовка

Результаты СПФ полусфер и цилиндров при пониженных температурах послужили основой для изготовления методом СПФ многослойных конструкций из сварных заготовок, полученных сваркой давлением (СД). Температура СД, при которой в промышленности изготавливают многослойные конструкции из титанового сплава ВТ6, также составляет 900°C [1]. Наиболее

известным титановым изделием, получаемым методом СД/СПФ, является полая лопатка вентилятора двигателя семейства Trent фирмы Rolls-Royce.

Полую лопатку с наполнителем гофрового типа изготавливают из трех листовых заготовок по схеме СД-СПФ [14]. На регламентированные участки поверхности листовых заготовок наносят противосварочное покрытие, далее заготовки собирают в пакет, нагревают и прикладывают давление с наружных сторон пакета. В результате СД заготовки соединяются друг с другом на участках без покрытия. Затем сваренный пакет помещают в пресс-форму. Во внутреннюю полость пакета подают газ под давлением и осуществляют СПФ. При этом наружные заготовки приобретают форму матриц штампа, а внутренняя заготовка наполнителя образует наклонные ребра жесткости. Угол наклона ребер, их длина задаются рисунком покрытия.

В работах [15,16] было показано, что НС листы из титанового сплава ВТ6 можно соединять методом СД при пониженных температурах. Впервые трехслойная конструкция гофрового типа из НС листов с размером зерен 200 нм была получена при температуре 750°C [17].

Кроме высокой температуры процесса СД/СПФ, другой проблемой, существующей при формообразовании трехслойной конструкции, является опасность возникновения складок («утяжин») на наружной поверхности обшивок по границе их сопряжения с наполнителем. В процессе формовки часть заготовки обшивки, более тонкая, приходит в контакт с поверхностью матрицы, а другая часть, соединенная с заготовкой наполнителя, отстает. При этом, чем больше строительная высота конструкции, тем большая вероятность появления складок. Для устранения складкообразования применяют различные технологические приемы. На наружные поверхности заготовок обшивок перед СПФ устанавливают технологические пластины, производят предварительное упрочнение заготовок обшивок путем огрубления структуры, используют заготовки обшивок с большей в 2-3 раза толщиной по сравнению с заготовкой наполнителя.

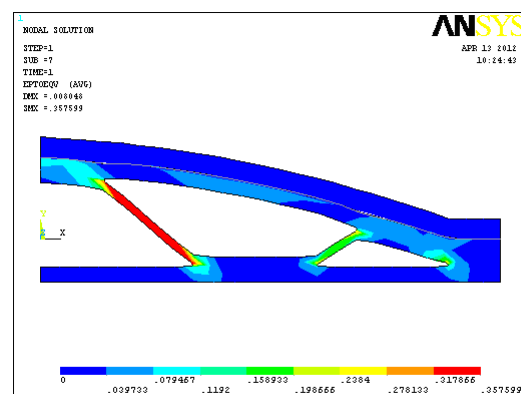


Рис. 4. Эпюра распределения эквивалентных деформаций в трехслойной конструкции.

Комплексным решением проблемы по снижению температуры процесса и устранению складок является использование НС листа в качестве заготовки наполнителя, при этом заготовки обшивок следует выполнять из

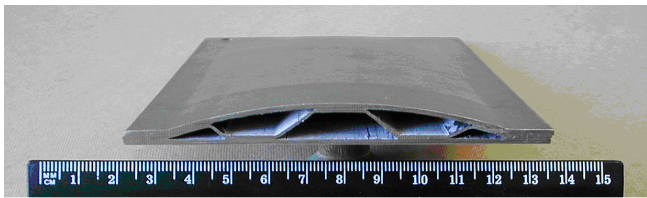


Рис. 5. Трехслойная конструкция, полученная при 750°C.

МК полуфабрикатов. Основанием для такого решения, служат результаты моделирования процесса формообразования трехслойной конструкции. По распределению эквивалентных деформаций в трехслойной конструкции (рис. 4), видно, что деформация сосредотачивается в ребрах конструкции и существенно превышает деформацию в обшивках.

Для экспериментального подтверждения была изготовлена трехслойная конструкция (рис. 5), в которой заготовками обшивок служили МК листы, а заготовкой наполнителя был НС лист с размером зерен 200 нм. Операции СД и СПФ выполняли при температуре 750°C. Соединения, полученные СД заготовок, позволили без отрывов получить требуемую форму конструкции [18]. Однако характеристики конструкционной прочности полученной конструкции требуют дальнейших исследований.

4. Заключение

1. Установлено, что наноструктурное состояние обеспечивает хорошую формуемость листов титанового сплава ВТ6 и позволяет получать требуемую форму изделий при температуре СПФ от 550°C и выше.

2. Температура 600°C является оптимальной для СПФ изделий из НС листов титанового сплава ВТ6.

3. Показана возможность изготовления трехслойных конструкций с гофрированным наполнителем из наноструктурного титанового сплава ВТ6 при температуре 750°C.

Литература

1. N.E. Paton and C.H. Hamilton, ed. Superplastic Forming of Structural Alloys. The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Pennsylvania (1982).
2. K.A. Padmanabhan, R.A. Vasin, F.U. Enikeev. Superplastic Flow: Phenomenology and Mechanics, Springer-Verlag, Berlin. Heidelberg, Germany. 2001. 363 p.
3. M.J. Donachie Jr., Introduction to titanium and titanium alloys, in Titanium and Titanium Alloys Source Book, ed. by M.J. Donachie Jr. (ASM International, Metals Park, 1982) p. 3.
4. C. Ouchi, K. Minakawa, K. Takahashi, A. Ogawa and M. Ishikawa. NKK Technical Review **65**, 61 (1992).
5. R.Z. Valiev, O.A. Kaibyshev, R.I. Kuznetsov, R.Sh. Musalimov, N.K. Tsenev. Dokl. Akad. Nauk SSSR **301**, 864 (1988), (in Russian).
6. L.D. Hefti. Mater. Sci. Forum **551-552**, 87 (2007).
7. S.V. Zherebtsov, R.M. Galeev, O.V. Valiakhmetov, et. al. Forging and Stamping Production. Materials Working by Pressure **7**, 17 (1999), (in Russian).

8. Patent RU 2134308, C22F 1/18 (1999).
9. O.A. Kaibyshev, R.V. Safiullin, R.Ya. Lutfullin, O.A. Rudenko, O.V. Valiakhmetov, A.G. Ambarnikov. In: Current Status of Theory and Practice of Superplasticity in Materials. Ufa, Gilem (2000) p. 318, (in Russian).
10. Patent RU 2320771, C22F 1/18 (2008).
11. O.A. Rudenko, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin, O.V. Valiakhmetov, R.Ya. Lutfullin. Forging and Stamping Production. Materials Working by Pressure **4**, 5 (2006), (in Russian).
12. N.I. Noskova and R.R. Mulyukov. Submicrocrystalline and Nanocrystalline Metals and Alloys. Ekaterinburg, UrD RAS (2003) 279 p. (in Russian)
13. A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov, O.A. Rudenko, R.V. Safiullin. Journal of Advanced Materials **6**, 79 (2005), (in Russian)
14. Patent EP 0568201, B21D 53/78 (1993).
15. M.Kh. Mukhametrakhimov. Rev. Adv. Mater. Sci. **25**(3), 273 (2010).
16. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials **1**, 59 (2011) (in Russian).
17. R.Ya. Lutfullin, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin, M.Kh. Mukhametrakhimov, O.A. Rudenko. Mater. Sci. Eng. A503, 52 (2009).
18. A.A. Kruglov, O.A. Rudenko. In: Abstracts of Papers of the Open School-Conference CIS Countries "Ultrafine-Grained and Nanostructured Materials", Ufa, Russia, August 4-9, 2008 (Bashkir State University, Ufa, 2008), p. 194, (in Russian).