

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

О. В. Огорокова

*ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
Металлургический институт, Российская Федерация*

Научный руководитель И. А. Цыганов

Титановые сплавы востребованы в авиации, космонавтике, кораблестроении, так как они обладают малой плотностью, высокой удельной прочностью, отличной коррозионной стойкостью. Получение ультрамелкозернистой структуры помогает повысить механические свойства, а именно добиться высоких значений статической и циклической прочности, износостойкости, что впоследствии позволит уменьшить габариты конструкций [1]. Структура с величиной зерна менее 1 мкм дает технологические преимущества при формовке, сверхпластической штамповке. Низкотемпературная сверхпластичность характеризуется сохранением ультрамелкозернистой структуры (УМЗ).

Многочисленные исследования и опыт эксплуатации авиакосмических конструкций показал, что сплавы с $(\beta + \alpha)$ -структурой обеспечивают лучшее сочетание прочностных и пластических характеристик, высокий ресурс надежности. Легирование и дисперсионное упрочнение α - и β -фаз после термической обработки – закалки и старения – повышают уровень механических свойств [2].

Содержание 50 % α -фазы и 50 % β -фазы обеспечивает максимальный предел прочности, что связано с гетерогенным характером микроструктуры. После закалки и старения в структуре образуется достаточное количество упрочняющих фаз, причем их состав приближен к критическому. Благодаря термоупрочняющей обработке можно достичь прочности порядка 2 000 МПа, но при этом произойдет ухудшение пластичности. Эта проблема является основной при получении высокопрочного сплава. Поэтому разработка способов производства сплавов с УМЗ структурой с высокими механическими свойствами в результате проведения интенсивной пластической деформации является серьезной задачей.

Добиться измельчения структуры возможно, применив большие степени деформации при пониженных температурах $T < (0,3-0,4) \cdot T_{пл}$, но для этого необходимо специальное оборудование [3]. Такие параметры, как степень, способ, скорость, температура деформации, являются основными при трансформации структуры.

Целью исследования является:

1. Изучение кинетики и механизмов формирования структуры двухфазных титановых сплавов при больших степенях деформации в широком интервале температур и рекомендация режима деформационной обработки, позволяющая получить фрагментированную структуру.

2. Установление закономерности влияния температуры и степени деформации на механизмы структурных изменений при $T < 0,5 T_{пл}$ и определить условия получения УМЗ структуры.

Методика исследований. В качестве материала для исследований использовались листы титанового сплава ВТ6, изготовленные из прутков по ГОСТ1 90173–75. Химический состав сплава (вес. %) следующий: Al \approx 6,05; V \approx 4,0; Zr \approx 0,17; Si \approx 0,09; Fe \approx 0,26; C \approx 0,07; O₂ \approx 0,15; N₂ \approx 0,01; H₂ \approx 0,01.

Заготовки $\varnothing 40 \times 60$ мм с мартенситной структурой получены в результате закалки ($1150\text{ }^{\circ}\text{C}$) с последующим охлаждением в воде. Далее проводили всестороннюю деформацию на гидравлическом прессе DEVR400 в изотермических условиях в интервале $500\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень деформации составляет: $e = 12$.

Для определения влияния температуры и деформации на характер структурных изменений в сплаве из листов вырезали образцы размером $1 \times 10 \times 10$ мм. Исследование микроструктуры проводили методами световой микроскопии и количественного металлографического анализа на микроскопе *Axio Observer D1m*. Размер зерна определяли методом случайных секущих с помощью компьютерной программы *Axio Vision Red 4.8*. Подготовка образцов для анализа структуры включала предварительную шлифовку с применением шлифовальной бумаги и электрохимическую полировку в электролите состава: хлорная кислота – 60 мл, *n*-бутиловый спирт – 350 мл, метиловый спирт – 600 мл. Напряжение полировки 29,5 В, температура электролита $-35\text{--}-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты. Выполнено исследование по определению кинетики пластинчатой структуры в интервале температур $T > (0,4\text{--}0,5) \cdot T_{\text{пл}}$ для сплава ВТ6. Температура полиморфного превращения $995\text{ }^{\circ}\text{C}$. Метод всесторонней изотермической деформации (ВИД), представляющий собой операции осадки и протяжки с изменением оси деформации, применяется для получения глобулярной УМЗ структуры. На рис. 1 показана схема обработки.

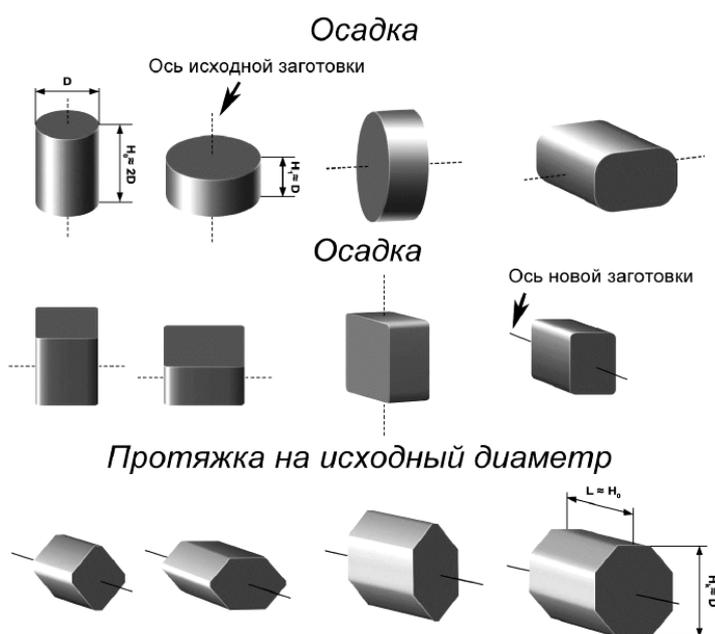


Рис. 1. Схема всесторонней изотермической деформации

Проведение контролируемого отжига между проходами ускоряет формирование УМЗ структуры. Исходное состояние – состояние после закалки, величина зерна около 2 мкм. Первую деформацию осуществляют при более высокой температуре ($700\text{ }^{\circ}\text{C}$) для формирования мелкозернистой структуры, затем температуру понижают на $100\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень деформации 93 %. Минимальная температура зависит от химического состава и требуемых характеристик. Получена заготовка размером $\varnothing 150 \times 200$ мм со структурой величиной 0,4 мкм (рис. 2) при температуре $700\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Предел прочности составляет 1300 МПа.

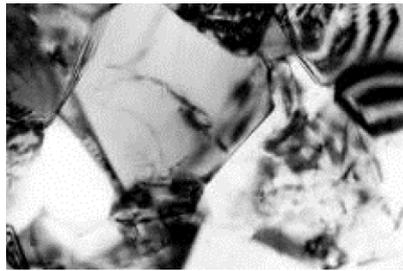


Рис. 2. Микроструктура сплава ВТ6 после ВИД при 700 °С

Всесторонняя изотермическая деформация приводит к росту прочностных характеристик на 20 % по сравнению с обычной обработкой. Снижение пластичности связано с плохой способностью титанового сплава к деформационному упрочнению. В таблице приведены данные по механическим свойствам.

Механические свойства титанового сплава ВТ6

| Состояние | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % |
|-----------|----------------------|------------------|--------------|
| УМЗ | 1100 | 1400 | 8 |
| МЗ | 940 | 1200 | 11 |

После проведения данной обработки образцы подвергли листовой прокатке. При горячей пластической деформации важно задать правильную температуру нагрева, при которой не будет происходить роста зерен, приводящего к ухудшению свойств, а пластичность останется на таком же уровне. Для сплава ВТ6 нагрев выше 600 °С неприемлем вследствие протекания разупрочнения, уменьшения плотности дислокаций. Прокатка образцов осуществлялась на двухвалковом стане с подогревом валков. Степень обжатия за один проход составила 10 %, после каждого прохода подогревали. В итоге получили лист толщиной 1 мм, структурное состояние представлено зерном величиной 200 нм. Характеристики прочности и пластичности однородно распределены в перпендикулярных направлениях ($\sigma_B = 1350$ МПа; $\delta = 5$ %).

Заключение. Двухфазные сплавы отличаются хорошей кинетикой образования УМЗ структуры. Режимы деформационной обработки с использованием всесторонней изотермической деформации и последующей обработкой – винтовая, сортовая, листовая прокатка, ротационная ковка – обеспечат высокий уровень механических характеристик.

Превращение пластинчатой структуры в глобулярную при деформации и отжига при $T < 0,5 \cdot T_{пл}$ происходит благодаря делению пластин α -фазы с последующей сфероидизацией α -фазы.

Литература

1. Grain Boundary Films in Al–Zn Alloys after High Pressure Torsion / B. B. Straumal [et al.] // Scripta Materialia. – 2014. – P. 59–62.
2. Kawasaki, M. Review: Achieving Superplastic Properties in Ultrafine Grained Materials at High Temperatures / M. Kawasaki, T. G. Langdon // Journal of Materials Science. – 2016. – P. 19–32.
3. Эффективность применения метода интенсивной пластической деформации в технологическом процессе получения штамповок лопаток компрессора ГТД / В. В. Латыш [и др.] // Кузнечно-штамповоч. пр-во. – 2012. – С. 18–25.