Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. Р. Саитова, И. П. Семенова, И. В. Александров, Исследование однородности структуры заготовок из сплава ВТ6, подвергнутого равноканальному угловому прессованию, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004, выпуск 27, 164–169

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu296>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.234.156.22

26 апреля 2023 г., 11:55:10

12. Герасимов Я.И., Куценок И.Б., Гейдерих В.А. Исследование термодинамических свойств теллуридов меди методом мгновенного фиксирования ЭДС электрохимического элемента // Докл. АН СССР. 1979. Т. 244. № 3. С. 633-635.
13. Аббасов А.С., Азизов Т.Х. Исследование термодинамических свойств теллуридов меди / Баку: БГУ. 1976. Деп. в ВИНТИ. 1976. №1587-76. 4 с.
14. Куценок И.Б., Гейдерих В.А., Валуев И.А. Применение метода мгновенного фиксирования ЭДС для исследования термодинамических свойств твердых сплавов // Вест. Моск. ун-та. Сер. Химия. 1980. Т. 21. № 6. С. 554-558.
15. Гейдерих В.А., Куценок И.Б. Кинетика установления стационарного значения ЭДС гальванических элементов амальгамного типа // Журн. физ. химии. 1981. Т. 55. № 10. С. 2612-2615.
16. Куценок И.Б., Гейдерих В.А. Регистрация ионов разного заряда в водных растворах электролитов методом мгновенного фиксирования ЭДС // Электрохимия. 1981. Т. 17. № 3. С. 353-356.
17. Гейдерих В.А., Шевелева С.Н., Куценок И.Б., Кривошея Н.С. Термодинамические свойства теллуридов никеля // Журн. физ. химии. 1980. Т. 54. № 4. С. 1068-1071.
18. Куценок И.Б., Гейдерих В.А., Герасимов Я.И., Ялканен Х. Исследование термодинамических свойств сплавов индий-медь методом мгновенного фиксирования ЭДС // Журн. физ. химии. 1983. Т. 57. № 11. С. 2712-2716.
19. Куценок И.Б., Могутнов Б.М., Ростовцев Р.Н., Гейдерих В.А. Относительная термодинамическая стабильность аустенита и мартенсита в системе железо-никель // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. №1. С. 118-120.
20. Ростовцев Р.Н., Куценок И.Б., Могутнов Б.М., Гейдерих В.А. Термодинамическое исследование неравновесных сплавов системы железо-никель // Журн. физ. химии. 1986. Т. 60. № 10. С. 2414-2417.
21. Куценок И.Б., Гейдерих В.А., Люцарева Н.С., Калинин А.В. Термодинамика равновесных и закаленных сплавов системы олово-медь // Журн. физ. химии. 1986. Т. 60. № 10. С. 2623-2626.
22. Корнилова Е.Н., Куценок И.Б., Глезер А.М., Гейдерих В.А. Термодинамические свойства аморфных сплавов системы Fe-Cr-B // Журн. физ. химии. 1990. Т. 64. № 12. С. 3203-3207.
23. Schwitzgebel G., Lang I., Sass R. Reversible electrode potentials of intermetallic phases of (Fe,Zn), (Ni,Zn) and (Ag, Zn) at 25°C // Z. Phys. Chem. Neue Folge. 1985. Bd. 146. S. 87-96.
24. Ростовцев Р.Н., Куценок И.Б., Могутнов Б.М., Гейдерих В.А. Активность железа в мартенситных и аустенитных железоникелевых сплавах и энергии Гиббса их образования // Журн. физ. химии. 1988. Т. 62. № 2. С. 546-551.

УДК 539.31

Л.Р. Саитова, И.П. Семенова, И.В. Александров

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА ВТ6, ПОДВЕРГНУТОГО РАВНОКАНАЛЬНОМУ УГЛОВОМУ ПРЕССОВАНИЮ

Исследовано влияние геометрии оснастки на структуру, ее однородность и механическое поведение двухфазного сплава ВТ6 в процессе РКУП. Изучены особенности формирования УМЗ структуры после РКУП, реализованного на оснастке с углом пересечения каналов 120 и 135° при T=700°С.

В последние годы особый интерес исследователей направлен на формирование в металлах и сплавах ультрамелкозернистых (УМЗ) состояний с целью повышения их комплекса свойств. Перспективным методом получения объемных УМЗ образцов является интенсивная пластическая деформация (ИПД) путем равноканального углового прессования (РКУП), позволяющего сформировать в объемных заготовках УМЗ структуру без изменения их геометрических размеров [1].

Для получения УМЗ структур обычно требуется многопроходное РКУП, которое для пластичных металлов, например Cu, Al, Ti, может быть проведено уже при комнатной температуре [1,2]. Однако, для сложных малопластичных материалов, к числу которых относится двухфазный сплав ВТ6, проведение РКУП сопряжено с определенными трудностями, связанными с низкой деформируемостью сплава, высокой прочностью и его быстрым разрушением. Важным условием обеспечения стабильности свойств полученных материалов является также формирование УМЗ структуры, однородной по всему объему заготовки. Решение данной задачи может быть достигнуто путем определения оптимальных параметров РКУП-обработки материалов, таких, как температура, угол пересечения каналов в оснастке, маршрут движения заготовки, количество циклов прессования и др.

В связи с этим, целью работы является исследование особенностей формирования УМЗ структуры и механического поведения в сплаве ВТ6 при РКУП, реализованном на оснастке с разным углом пересечения каналов.

Для проведения исследований был использован сплав ВТ6 (Ti-основа; Al – 6,6%; V – 4,9%; Zr – 0,02%; Si – 0,033%; Fe – 0,18%; C – 0,007%; O₂ – 0,17%; N₂ – 0,01%; H₂ – 0,002%). Прутки диаметром 20 мм были изготовлены методом горячей прокатки с последующим отжигом при T=750°С в течение 1 часа, что позволило получить (α+β) микроструктуру преимущественно

глобулярного типа с равноосными зёрнами α -фазы размером 3-5 мкм и небольшим количеством межкристаллитной β -фазы (рис. 1).

Для РКУП сплава были изготовлены оснастки с углами пересечения каналов (ϕ) 135° и 120° (рис. 2), использован маршрут Вс, при котором заготовка после каждого прохода поворачивается по часовой стрелке вокруг своей продольной оси на 90° . Температура прессования была $\sim 700^\circ\text{C}$.

Для исследования микроструктуры сплава использовали оптическую металлографию и просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ). С целью исследования однородности микроструктуры заготовок после РКУП оптическая металлография проводилась в продольном сечении заготовок в областях, указанных на рис. 3.

Р и с. 1 Микроструктура сплава ВТ6 в исходном состоянии: а – поперечное сечение; б – продольное сечение. Оптическая металлография.

Р и с. 2 Схема ИПД методом РКУП

Р и с. 3. Схема исследования однородности микроструктуры заготовок методом оптической металлографии и методом измерения микротвердости

Исследования методом ПЭМ проводились на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100B с ускоряющим напряжением 100кВ. Картины микродифракции получали с площади $\sim 2 \text{ мкм}^2$. Тонкие фольги для ПЭМ были получены электроискровой вырезкой пластинок толщиной 0.8-1.0 мм, с последующим механическим утонением и электролитическим полированием при комнатной температуре.

Для измерения микротвердости образцов после РКУП в областях, указанных на рис. 3, был использован микротвердомер ПМТ-3М, нагрузка на индентор составляла 100 г, а время приложения нагрузки – 10 секунд.

Механические испытания на растяжение проводили при комнатной температуре (20°C) на машине Instron со скоростью 1 мм/мин. Образцы для испытаний с диаметром рабочей части 3 мм и длиной 30 мм были вырезаны из центральной части прутка в направлении его продольной оси.

На оснастке с $\phi=135^\circ$ при $T=700^\circ\text{C}$ заготовки без признаков разрушения выдерживали 12 циклов прессования, на оснастке с $\phi=120^\circ$ – 8 циклов. Суммарная накопленная истинная деформация в обоих случаях составила $e = 6$.

Оптическая металлография. Исследование микроструктуры заготовок методом оптической металлографии в разных зонах по длине заготовки показали, что наиболее однородная структура формируется в средней части заготовки (зоны 7,8,9). На концах заготовки (зона 6), область которых занимает около 15 мм, структура более крупнозернистая и неоднородная.

Детальное исследование микроструктуры образцов в средней части заготовки (зона 10) показало, что после РКУП на оснастке с $\phi=135^\circ$ и с $\phi=120^\circ$ наблюдается значительное измельчение зеренной структуры α -фазы как в продольном, так и в поперечном сечениях (рис. 5). Ис-

ходные границы α -фазы не просматриваются, а равномерное травление поля микрошлифов свидетельствует об однородности полученной структуры по сечению образца. В продольном сечении заготовок, полученных на оснастке с $\varphi=135^\circ$, была выявлена удлиненная форма зерен (рис. 4а, 5а), тогда как в поперечном сечении большинство зерен имели равноосную форму. РКУП на оснастке с $\varphi=120^\circ$ (8 проходов) привело к формированию более равноосной структуры, как в продольном так и в поперечном сечениях (рис. 4б, 5б).

Просвечивающая электронная микроскопия. На рис. 6 представлены типичные ПЭМ-изображения микроструктуры (зона 10), наблюдаемые в образцах, полученных РКУП на оснастке с $\varphi=120^\circ$ и 135° . Видно, что после РКУП на оснастке с $\varphi=135^\circ$ (рис. 6 а, б) наряду с измельчением зерен наблюдается появление тонких (толщиной около 50 нм) двойников, расположенных внутри отдельных зерен, имеющих размер около 600-800 нм. Приведенная дифракционная картина содержит сильно размытые рефлексы, что свидетельствует о высоких внутренних напряжениях в структуре.

В то же время после РКУП на оснастке с углом пересечения каналов $\varphi=120^\circ$ (рис. 6 в, г) УМЗ структура более свободна от двойников и дефектов упаковки. Судя по дифракционной картине, в структуре много субзерен с малоугловыми разориентировками, т.е. УМЗ структура является зеренно-субзеренной. Двойники толщиной 50-80 нм были обнаружены только в небольшом количестве зерен – до 30 %.

Р и с. 4. Структура сплава ВТ6 после РКУП: а – $\varphi=135^\circ$, 700°C , 12 проходов; б – $\varphi=120^\circ$, 700°C , 8 проходов; продольное сечение. Оптическая металлография.

Р и с. 5. Структура сплава ВТ6 после РКУП: а – $\varphi=135^\circ$, 700°C , 12 проходов; б – $\varphi=120^\circ$, 700°C , 8 проходов. Оптическая металлография.

Р и с. 6. Структура сплава ВТ6 после РКУП: а – $\varphi=135^\circ$, 700°C , 12 проходов, поперечное сечение; б – $\varphi=135^\circ$, 700°C , 12 проходов; продольное сечение; в – $\varphi=120^\circ$, 700°C , 8 проходов; поперечное сечение; г – $\varphi=120^\circ$, 700°C , 8 проходов; продольное сечение. ПЭМ.

Слабое азимутальное размытие точечных рефлексов на электронограммах, снятых с участков с глобулярной структурой (рис. 6в), указывают на уменьшение внутренних напряжений. Тогда как на электронограммах, снятых с участков, имеющих двойники и дефекты упаковки (рис. 6г), наблюдали сильное азимутальное размытие рефлексов, указывающее на высоких уровень внутренних напряжений.

Микротвердость и механические свойства. Для оценки однородности структуры РКУП-заготовок из сплава ВТ6 были проведены измерения микротвердости в продольном сечении по схеме, приведенной на рис. 3 (области 6А – 10А). Как видно из рис. 7, в заготовках в результате измельчения структуры наблюдается заметное увеличение микротвердости после РКУП по сравнению с исходным состоянием. При этом микротвердость сплава после РКУП на осястке с $\varphi=135^\circ$ выше, чем в сплаве после РКУП с $\varphi=120^\circ$. После РКУП в обоих случаях наибольшая микротвердость наблюдается в средней части, а наиболее низкая – на расстоянии до 10-15 мм от конца заготовки, где структура менее проработана вследствие неоднородности процесса деформации на входе и выходе заготовки. Разница микротвердости между концом и серединой заготовки составляет 20% для $\varphi=135^\circ$ и 11% для $\varphi=120^\circ$.

Р и с. 7. Микротвердость заготовок в исходном состоянии и после РКУП

Исследования механических свойств на растяжение при комнатной температуре показали также значительное упрочнение сплава после РКУП (см. таблицу), при сохранении достаточной пластичности. Данные по прочности согласуются с полученными значениями микротвердости.

Механические свойства сплава ВТ6 после РКУП

Состояние сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Исходное состояние	1060	990	18	44
РКУП, $\varphi=135^\circ$	1400	1340	10	42
РКУП, $\varphi=120^\circ$	1200	1160	11	42

Результаты настоящего исследования свидетельствуют о том, что, используя РКУП, можно получить УМЗ структуру даже в малопластичных, труднодеформируемых сплавах, таких как титановый сплав ВТ6. Важными параметрами для обеспечения деформируемости сплава являются не только температура РКУП, но и конструкция оснастки.

Исследование методом оптической металлографии показало, что структура на концах заготовки на расстоянии примерно 15 мм менее однородна по сравнению со средней частью, что подтверждается замерах микротвердости. Это можно объяснить еще неустановившейся стадией деформации при РКУП на входе в каналы, обусловленной геометрией инструмента. Разница микротвердости между концом и серединой заготовки, полученной после РКУП с $\varphi=135^\circ$, составляющая 20% больше разницы между концом и серединой заготовки, полученной после РКУП с $\varphi=120^\circ$. Это свидетельствует о более однородном распределении микротвердости по сечению заготовки, полученной после РКУП с $\varphi=120^\circ$, что соответствует более однородной микроструктуре, выявленной методом оптической металлографии.

Проведенные ранее исследования методом ПЭМ показали, что в чистом титане после РКУП формируется равноосная зеренная структура с размером зерна ~ 260 нм [2,3]. В отличие от чистого титана в сплаве ВТ6 после РКУП ($\epsilon=6$) формируется сложная зеренная/субзеренная структура с высокой плотностью дислокаций и внутренними упругими напряжениями. Структура сплава ВТ6, полученная после РКУП, свидетельствует о развитии механизма двойникования в процессе деформации. Хотя склонность α -фазы к деформации двойникованием уменьшается с повышением температуры, этот механизм деформации наблюдался также при горячей (925°C) деформации сплава ВТ6 [4,5]. Механизмы пластической деформации в сплаве ВТ6 в процессе РКУП исследуются в настоящее время.

Результаты данного исследования показали также, что морфология структурных составляющих и свойства сплава зависят от угла пересечения каналов. Использование оснастки с $\varphi=120^\circ$ при одинаковой степени накопленной деформации $\epsilon=6$ приводит к формированию более однородной и равноосной УМЗ структуры, чем для оснастки с $\varphi=135^\circ$.

Обнаруженные различия в структуре, формирующейся в заготовках сплава ВТ6, полученных РКУП на оснастке с $\varphi=120^\circ$ и $\varphi=135^\circ$ определяют их разные механические свойства. Более высокие прочностные свойства сплава ВТ6, полученного при РКУП на оснастке с $\varphi=135^\circ$ обусловлено, по-видимому, прежде всего наличием микродвойников и повышенным уровнем упругих напряжений, а также формированием текстуры в продольном сечении.

Таким образом, можно сформулировать следующие выводы.

1. Успешно проведено многопроходное РКУП сплава ВТ6, которое позволило сформировать в нем УМЗ структуру.
2. Установлено, что существенное влияние на микроструктуру и механические свойства сплава оказывает геометрия оснастки РКУП. В структуре сплава ВТ6 после РКУП на оснастке с $\varphi=120^\circ$ формируется более равноосная и однородная зеренно/субзеренная структура.
3. При ПЭМ-исследовании структуры сплава ВТ6 после РКУП как на оснастке с $\varphi=135^\circ$ так и на оснастке с $\varphi=120^\circ$ обнаружены микродвойники, свидетельствующие о развитии механизма двойникования в процессе ИПД. Однако в микроструктуре образцов после РКУП на оснастке с $\varphi=135^\circ$ доля кристаллитов с микродвойниками больше чем на оснастке с $\varphi=120^\circ$.
4. Измельчение структуры после РКУП привело к заметному увеличению прочности сплава ВТ6. При этом более высокие прочностные свойства сплава ВТ6 получены после РКУП на оснастке с $\varphi=135^\circ$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R.Z.Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // Progr. Mater. Sci. 2000. 45. P.103-189.
2. R.Z.Valiev, V.V. Stolyarov, V.V. Latish, G.I.Raab, T. C. Lowe, Y.T. Zhu // 9th Int.Conf. Titanium-99. V3 (2000). P. 1569-1572.
3. V.V. Stolyarov, Y.T. Zhu, T. C. Lowe, R.Z. Valiev // Mater.Sci. A303 (2001). P. 82-89.
4. Колачев Б.А. Физическое металловедение титана. М.: Металлургия, 1976. 184 с.
5. Металловедение титана и его сплавов / Под редакцией С.Г. Глазунова, Б.А. Колачева. М.: Металлургия, 1992. 357 с.

УДК 662.2

А.И. Сафронов

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТЕЙ МЕТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Обоснована перспективность использования новой схемы метания с присоединенным зарядом для проведения экспериментальных исследований. Приведена математическая модель процесса и схема ее численного решения. Даны результаты модельных расчетов.

Важнейшей проблемой при проведении исследований поведения материалов и прочности элементов конструкций, работающих в условиях интенсивных импульсных воздействий, является проблема получения высоких начальных скоростей ударников.

Классическая схема выстрела исчерпала свои возможности повышения начальных скоростей метания при неизменном максимальном давлении на дно канала ствола метательной установки. Решение проблемы повышения начальных скоростей метания возможно при использовании новых нетрадиционных схем метания, позволяющих управлять индикаторной диаграммой давления на метаемом элементе.

В работе моделируется функционирование схемы с присоединённым зарядом (рис.1) на основе модели двухфазной двухскоростной среды с учётом постепенного зажигания иницируемого состава. Постепенное воспламенение присоединённого заряда рассчитывается с учётом твёрдофазной локальной модели зажигания.

Систему уравнений газовой динамики для расчёта течения в области дополнительного заряда с учётом межфазного взаимодействия, постепенного иницирования и горения конденсированной фазы запишем на основе допущений [1] в неинерциальной системе координат ($O' - x'$), связанной с поршнем (рис. 1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho s \varphi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u s \varphi) = Me(t - t_3); \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho s \varphi u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho s \varphi u^2 + p s \varphi) = -\tau_{TP} + p \frac{\partial s \varphi}{\partial x} - \rho S \varphi \frac{dU_{II}}{dt}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho S \varphi E) + \frac{\partial}{\partial x}(S \varphi u (\rho E + p)) = MQe(t - t_3) - q_T e(t - t_3) - \rho S \varphi u \frac{dU_{II}}{dt}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{a_1 p^v}{e_B} e(t - t_3); \quad (4)$$

$$p \left(\frac{1}{\rho} - \alpha \right) = RT; \quad (5)$$

$$E = \varepsilon + \frac{u^2}{2};$$

$$\varphi = 1 - n\Lambda_0(1 - \Psi(z));$$

$$\psi(z) = \kappa_1 z(1 + \lambda_1 z);$$

$$M = SnS_{O_2} \rho_2 \sigma(\Psi) a_1 p; \quad (6)$$