

PACS: 81.40.-z

И.П. Семенова¹, В.В. Латыш², Г.Х. Садикова¹, Р.З. Валиев¹

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ТИТАНОВЫХ ДЛИННОМЕРНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

¹Институт физики перспективных материалов,
Уфимский государственный авиационный технический университет
ул. К. Маркса, 12, г. Уфа, 450000, Россия

²Научно-конструкторское технологическое бюро «Искра»
ул. Пушкина, 81, г. Уфа, 450000, Россия

Представлены результаты исследований влияния комбинированных режимов термомеханической обработки (ТМО) на микроструктуру и механические свойства полуфабрикатов из технически чистого титана. Комбинированный технологический процесс включал в себя равноканальное угловое прессование (РКУП) и ТМО. Использование данной схемы деформации позволило получить ультрамелкозернистые (УМЗ) заготовки из технически чистого титана Grade 2 диаметром 6.5 мм и длиной до 1000 мм. Изучены особенности формирования УМЗ-структуры в заготовках, эволюция механических свойств на различных этапах технологического процесса. Установлено, что формирование однородной УМЗ-структуры в полуфабрикате из технически чистого титана с размером зерен α -фазы около 70 нм позволяет повысить прочностные характеристики в 2.5 раза по сравнению с исходным отожженным состоянием. Пластичность при этом составила 12%.

Введение

К настоящему времени исследователями доказано, что измельчение зерна в металлах и сплавах и создание в них специальной УМЗ-структуры позволяют значительно улучшить их физико-механические свойства, такие как прочность, сопротивление усталости, сверхпластичность [1]. Проведенные ранее исследования [2–4] показали возможность формирования УМЗ-структуры в объемных заготовках из технически чистого титана, используя РКУП, сохраняющее без изменения геометрические размеры заготовки. Однако изготовление высокопрочных полуфабрикатов заданных размеров с УМЗ-структурой в промышленных условиях представляет собой самостоятельную проблему. С одной стороны, это решение задач, связанных с трудоемкостью, производительностью технологического процесса, с уменьшением коэффициента использования металла и др. С другой стороны, это фор-

мирование в заготовках по всей длине однородной УМЗ-структуры и стабильно высоких механических свойств.

В данной работе рассмотрен материаловедческий аспект процесса получения высокопрочных полуфабрикатов из чистого титана длиной более 1 м. В его основе лежит РКУП, в результате которого формируется УМЗ-состояние в исходной заготовке. Последующие стадии ТМО являются в основном формообразующими операциями, в процессе которых деформационное воздействие также оказывает заметную роль в структурообразовании полуфабриката и его свойств. Цель данной работы – систематические исследования эволюции микроструктуры и механических свойств титана на каждой стадии изготовления полуфабриката.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований были использованы горячекатаные прутки диаметром 40 мм из технически чистого титана Grade 2 (Ti – основа, C – 0.07%, O₂ – 0.25%, Fe – 0.3%, N – 0.05%) производства США. Структура прутков Grade 2 представляет собой глобулярную структуру с размером зерна α -фазы и в поперечном, и в продольном сечении 25–30 μm .

Заготовки подвергали РКУП по режиму: $T = 450^\circ\text{C}$, угол 90° , маршрут Bc, 4 прохода [3]. Последующие ТМО проводили в несколько стадий с общей накопленной деформацией около 80%. Вид заготовок на промежуточных стадиях представлен на рис. 1.

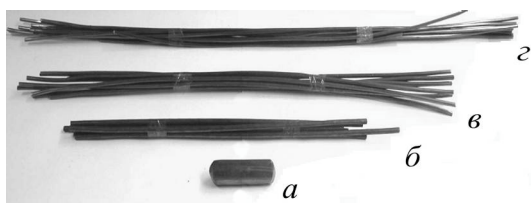


Рис. 1. Заготовки из титана Grade 2 на различных стадиях изготовления

Исследования микроструктуры промежуточных заготовок на стадиях технологического процесса проводили методами оптической металлографии и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Механические испытания на растяжение выполнены при комнатной температуре на машине Instron со скоростью нагружения 1 mm/min на стандартных образцах с диаметром рабочей части 5 mm.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные результаты исследования эволюции структуры в заготовке методом ПЭМ представлены на рис. 2. Установлено, что после 4 проходов РКУП как в продольном, так и в поперечном сечениях формируется равноосная УМЗ-структура с размером зерен 0.3–0.7 μm (рис. 2, I). Незначительное размытие рефлексов свидетельствует о достаточно низком уровне внутренних напряжений. Большое количество четких рефлексов по кольцам электронограммы говорит о том, что большинство зерен в структуре имеют высокоугловые границы.

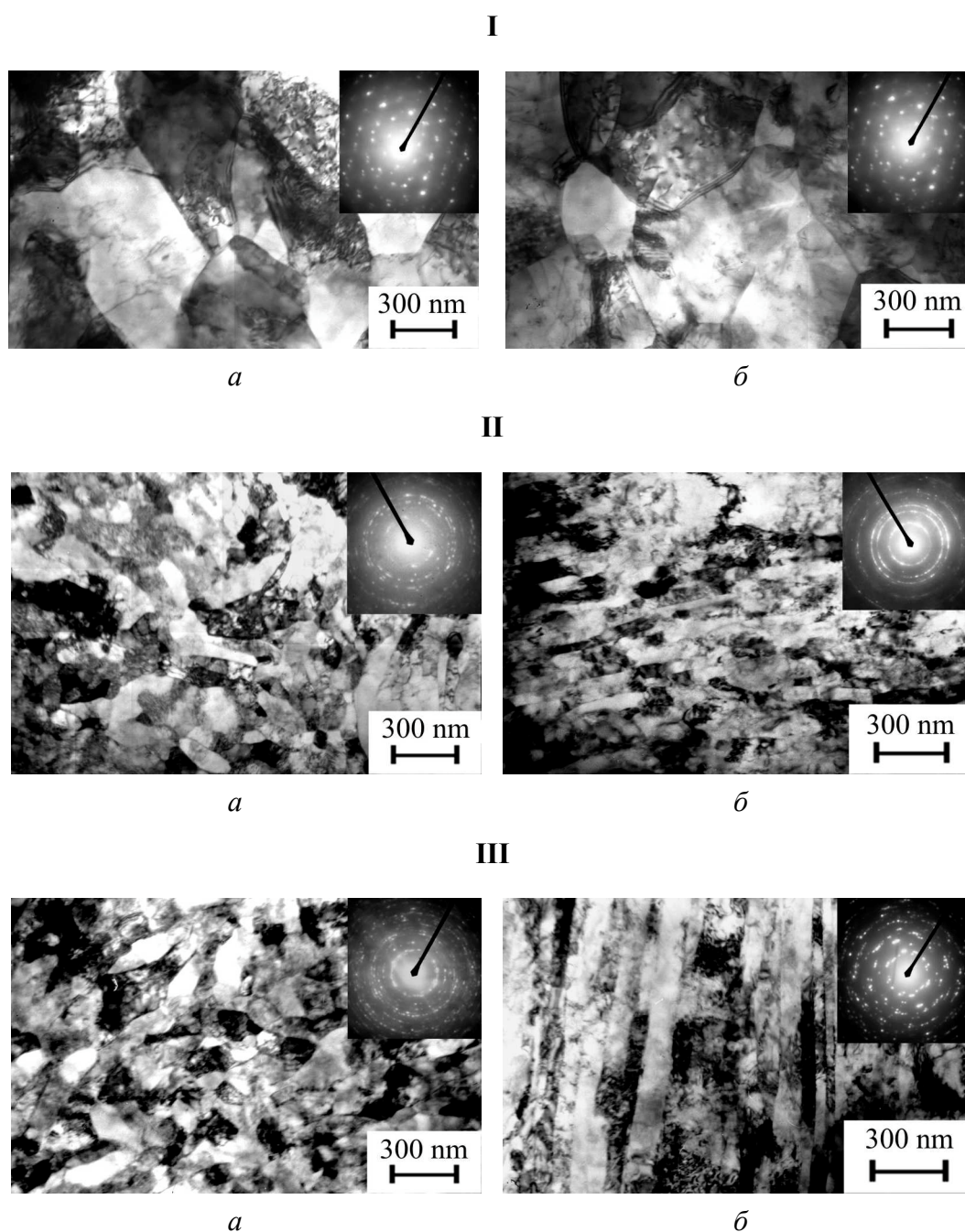


Рис. 2. Микроструктура титана Grade 2 после: I – РКУП, 4 прохода; II – РКУП, 4 прохода + ТМО ($\varepsilon = 60\%$); III – РКУП, 4 прохода + ТМО ($\varepsilon = 80\%$); *a* – поперечное сечение, *б* – продольное; ПЭМ

На первых стадиях ТМО происходило дополнительное измельчение и формирование в сплаве зеренно-субзеренной структуры. Размер отдельных зерен достигал 150 нм. Анализ электронограмм показал, что в структуре присутствуют как высоко-, так и малоугловые границы, азимутальное размытие точечных рефлексов указывает на увеличение внутренних напряжений (рис. 2, II).

После конечной операции ТМО в поперечном сечении заготовки структура становится однородной и равноосной, в продольном – сохраняется ее вытянутость в направлении деформации (рис. 2, III). При этом видно, что происходит дальнейшее измельчение зеренно-субзеренной структуры. В продольном сечении заготовки зерна с явно выраженной субструктурой сильно вытянуты вдоль направления деформации, а в поперечном – имеют равноосную форму со средним размером около 100 нм. Дифракционная картина характерна для УМЗ-состояния с преимущественно высокоугловыми границами. Плотность дислокаций очень высокая и по ПЭМ-изображениям структуры подсчитать ее величину не представилось возможным.

Из таблицы видно, что формирование структуры с размером зерна 0.5–0.7 мкм на стадии интенсивной деформации РКУП дает заметное упрочнение сплава. Последующая операция ТМО с суммарной накопленной деформацией до 60% за счет дополнительного измельчения структуры до размера зерен 150 нм и накопления дефектов кристаллического строения позволила повысить прочность до 1030 МПа, что уже в 2.5 раза выше прочности сплава в состоянии поставки. При этом наблюдалось снижение пластичности до 12%. Увеличение накопленной деформации до 80% за счет создания высокой плотности дислокаций в структуре и формирования металлографической текстуры способствовало повышению предела текучести по сравнению с отожженным состоянием почти в 3 раза. Величина сужения ψ немного уменьшилась, что обусловлено более высокой локализацией деформации в УМЗ-образцах при растяжении при комнатной температуре.

Таблица

Механические свойства заготовок из титана на различных стадиях деформационно-термической обработки

Состояние	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Исходное	440	370	38	60
РКУП, 4 прохода	630	545	22	51
РКУП, 4 прохода + ТМО ($\varepsilon = 60\%$)	1030	845	12	51
РКУП, 4 прохода + ТМО ($\varepsilon = 80\%$)	1150	1100	11	56

Исследование механических свойств по длине полуфабриката проводили на стандартных образцах, вырезанных по длине заготовки. Разброс значений пределов прочности и текучести образцов составляет в среднем 5%, что свидетельствует о формировании УМЗ-структуры, однородной по длине заготовки.

Заключение

Таким образом, результаты исследования эволюции микроструктуры и механических свойств длинномерных заготовок на разных стадиях их изготовления показали возможность получения высокопрочного состояния в длинномерных титановых полуфабрикатах, используя интенсивную пласти-

ческую деформацию. Основная роль в технологической схеме обработки принадлежит РКУП, в результате которого упрочнение достигается за счет интенсивного измельчения структуры. Сохранение достаточной пластичности УМЗ-титана после РКУП позволяет провести формообразующие операции ТМО, которые способствуют дополнительному измельчению зеренной структуры заготовки и формированию высокой плотности дислокаций. В итоге в полуфабрикate из технического чистого титана длиной до 1 м обеспечивается формирование однородной УМЗ-структуры с размером зерна около 70 nm, что приводит к повышению прочностных свойств сплава в 2.5 раза по сравнению с отожженным состоянием и к сохранению хорошей пластичности до 11%.

1. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.A. Alexandrov, Prog. Mater. Sci. **45**, 103 (2000).
2. Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, Acta Mater. **46**, 3317 (1998).
3. V.V. Stolyarov, Y.T. Zhu, I. Alexandrov, T.C. Lowe, R.Z. Valiev, Mater. Sci. Eng. **A303**, 82 (2001).
4. V.V. Stolyarov, Y.T. Zhu, I. Alexandrov, T.C. Lowe, R.Z. Valiev, MRS **A343**, 43 (2003).

I.P. Semenova, V.V. Latysh, G.H. Sadikova, R.Z. Valiev

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF LONG-SIZED Ti RODS WITH ULTRA-FINE GRAINED STRUCTURE

Recent studies of the effect of processing routes on microstructure and mechanical properties of long-sized rods out of nanostructured Ti are reported. The developed processing consisted of equal-channel angular pressing (ECAP) and thermomechanical treatment (TMT), it enabled to process ultra-fine grained (UFG) rods out of Ti of commercial purity Grade 2 6.5 mm in diameter and more than 1000 mm long. The paper presents the features of UFG structure in processed rods and evolution of mechanical properties at various stages of the technological process. It was established that the formation of homogeneous UFG structure in the rods out of CP Ti with α -phase grain size about 70 nm allowed a 2.5 times increase of the ultimate strength in comparison with the initial annealed state. Ductility of the rods constituted more than 12%.

Fig. 1. Billets out of Ti Grade 2 at various stages of their fabrication

Fig. 2. Microstructure of Ti Grade 2 after: I – ECAP, 4 passes; II – ECAP, 4 passes + TMT ($\epsilon = 60\%$); III – ECAP, 4 passes + TMT ($\epsilon = 80\%$); *a* – cross section, *b* – longitudinal; TEM