

2. M.V. Klimova, D.G. Shaysultanov, A.O. Semenyuk, S.V. Zhrebtsov, G.A. Salishev, N.D. Stepanov Effect of nitrogen on mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy at room and cryogenic temperatures // J. Alloys Compd. – 2020. – V. 849. – P. 156633.
3. Otto F., Dlouhyr A., Somsen Ch., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy // Acta Mater. – 2013. – V. 61. – P. 5743-5755.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT35 ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ

Э.К. АЛЕКСАНДРОВСКИЙ¹, И.П. МИШИН², Е.В. НАЙДЕНКИН², О.В. ЗАБУДЧЕНКО²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: eka8@tpu.ru

Титановые сплавы на основе β -фазы благодаря высоким удельным прочностным и усталостным характеристикам, а также высокой коррозионной стойкости представляют большой научный и практический интерес. [1,2]. По прогнозу научно-технологического развития России до 2030 г. перспективными рынками являются техника и инфраструктура связанные с космическим, авиационным и автотранспортным сектором экономики. Инновационными продуктами будут новые типы высокопрочных и лёгких материалов, которые возможно создать на основе наноструктурированных титановых сплавов [3]. Данные сплавы обладают высокой способностью к формации при низких температурах, что позволяет подвергать их холодной обработке давлением. Это может быть важно при производстве проволоки и прутков из титановых сплавов с высокими прочностными характеристиками. Известно, что проволоку из $\alpha+\beta$ -титановых сплавов производят методом горячей экструзии [1], что приводит к ее окислению и снижению пластичности [6]. В случае псевдо- β -титановых сплавов такое окисление в результате старения на воздухе приводило к одновременному снижению как пластичности, так и прочности сплава [7]. В связи с этим представляет интерес изучение возможности получения высокопрочной проволоки из титанового сплава преимущественно в условиях холодной деформации прокаткой. В данной работе изучена эволюция структуры, механических свойств Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr-1Mo-1Zr (сплав VT35) в процессе получения проволоки.

Исследования проводили на псевдо- β -титановом сплаве состава: Ti-14,5V-2,7Al-2,8Sn-2,8Cr-1,0Mo-0,9Zr ближайший зарубежный аналог сплав Ti 15333 (США). Предел прочности и пластичность промышленной поставки были 800 МПа и 20% соответственно. Комбинированная механическая обработка проводилась горячей радиально сдвиговой прокаткой (РСП) с предварительным нагревом до 850 °С и закалкой в воде с последующей прокаткой на стане с ручьевыми вальцами при комнатной температуре [7]. В результате многоступенчатой прокатки получена проволока сечением 1,5x1,5 мм² с коэффициентом вытяжки $k \sim 560$ (накопленная истинная логарифмическая деформация $e \sim 6.3$).

Рентгеноструктурные исследования показали, что с увеличением степени деформации наблюдается снижение размеров области когерентного рассеяния, сохранение 100-% β -фазы, при этом идёт рост текстуры (110).

Рассчитанная величина плотности дислокаций [8] с ростом степени деформации существенно возрастает с $1,5 \cdot 10^9$ см⁻² до $7,7 \cdot 10^{10}$ см⁻². Помимо этого, в сплаве с ростом деформации наблюдается непрерывное увеличение параметра решетки. Такое изменение

можно было бы связать с развитием мартенситного (β - α) фазового превращения, которое сопровождается перераспределением легирующих элементов.

Изучение механических свойств показало, что с увеличением степени деформации в сплаве наблюдается повышение прочностных характеристик с соответствующим снижением пластичности по сравнению с исходным состоянием за исключением деформации РСП. В этом случае прочностные характеристики практически не изменяются, а пластичность даже растет. Это может быть связано с высокой температурой РСП, что приводит, несмотря на увеличение вытянутости зерен и плотности дислокаций, к формированию более равновесных границ зерен, обеспечивающих аккомодацию (релаксацию) дислокаций при растяжении.

Испытания на растяжение проволоки показало, что, благодаря сформированной в результате прокатки полосовой структуре, в ней наблюдаются высокие прочностные характеристики ($\sigma_{\text{в}}=1320$ МПа), при сохранении удовлетворительной пластичности (6 %). Достигнутая прочность существенно превышает наблюдаемые величины в случае проволоки из $\alpha+\beta$ титанового сплава [9], а также из β титанового сплава [10].

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии в исследуемом сплаве наблюдается формирование полосовой фрагментированной структуры. Комбинированная прокатка приводит к уменьшению средней толщины зерен, вытянутых вдоль направления прокатки с 400 мкм до 41 нм. На ПЭМ-снимках продемонстрирована ориентация и размер вытянутых зёрен после комбинированной прокатки, рисунок 1.

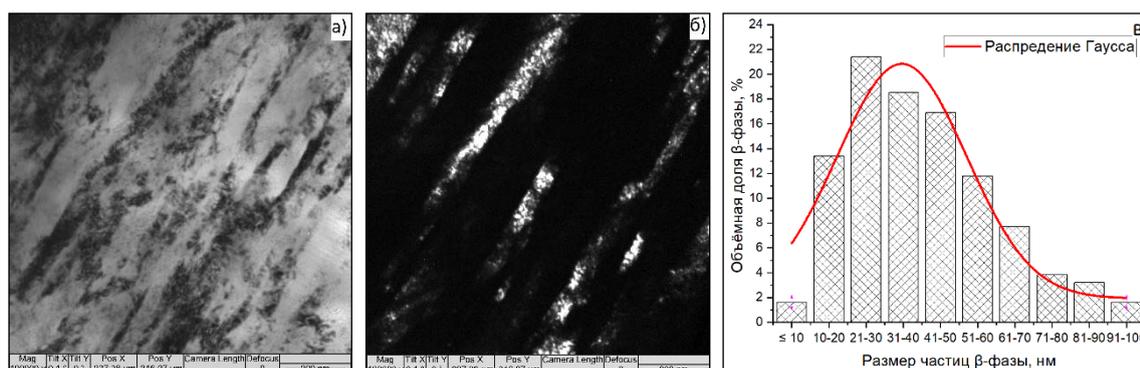


Рисунок 1 – ПЭМ-снимки после комбинированной прокатки: а) светлопольный; б) темнопольный; в) диаграмма нормального распределения размера β -фазы

Таким образом, проведенные исследования показали, что РСП в сочетании с ручьевого прокаткой до степени деформации $\epsilon \sim 6.3$ приводит к формированию в ВТ35 полосовой фрагментированной структуры средней толщиной 41 нм. В результате получена проволока из β -титанового сплава с высоким пределом прочности (1320 МПа) и удовлетворительной пластичностью (6 %).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00033).

Список литературы

1. Lütjering G., Williams J.C., (Springer, Berlin, Heidelberg, 2007).
2. Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Изотова А.Ю., Анташев В.Г. Перспективы разработки новых титановых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2011. – С. 60 – 67.
3. Прогноз научно-технологического развития России: 2030 / под ред. Л.М. Гохберга Москва: Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2014. – 244 с. – ISBN 978-5-906737-01-4.

4. Mouritz A.P., Woodhead, Publishing in Materials, (2012).
5. Weiss I., Semiatin S.L., Mater. Sci. Eng. A, 243, p. 46, (1998).
6. Ivasishin O.M., Teliovich R.V., Mater. Sci. Eng. A, 263, p. 142, (1999).
7. Naydenkin E.V., Mishin I.P., Ratochka I.V., Lykova O.N., Zabudchenko O.V. Mater. Sci. Eng. A., 769, p. 138495, (2020).
8. Williamson G.K. and Smallman R.E. Phil. Mag., 34, p. 1, (1956).
9. Hwang Y.M., Kuo G.W., Liu H.H., Proc. Man., 15, p. 294, (2018).
10. Chang H.P., Tseng Y.C., Kao. J. Med. Sci., 34, p. 202, (2018).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН ПРИ УДАРЕ

С.П. БАТУЕВ, П.А. РАДЧЕНКО, А.В. РАДЧЕНКО

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: spbatuev@gmail.com

Современные противоударные средства защиты представляют собой слоистую конструкцию из нескольких материалов. Одним из материалов, широко используемых в защитных конструкциях, является высокотвердая керамика. Наиболее широкое применение в противоударных конструкциях получили карбид бора (B_4C), карбид кремния (SiC), оксид алюминия (Al_2O_3). Керамические материалы имеют низкую плотность, высокие твердость, модуль упругости и прочность на сжатие. В тоже время керамика обладает низкой трещиностойкостью и прочностью на растяжение. Керамика располагается на фронтальной поверхности защитной конструкции, на подложке, которая обеспечивает защиту от фрагментов керамики и ударника. В качестве подложки используются пластичные металлические сплавы, полимерные материалы, композиты на основе углепластиков или органопластиков. Исследованию свойств высокотвердой керамики посвящено много экспериментальных, теоретических и численных работ, как российских, так и зарубежных исследователей, среди них можно отметить работы [1–4].

В нашей работе численно моделируется взаимодействие стального ударника (область D_1) с трехслойной преградой, рисунок 1. Материал верхнего слоя преграды – карбид бора (область D_2), последующие слои (области D_3 и D_4) состоят из алюминиевого сплава Д16Т и композиционного анизотропного материала (органопластик). Ударник взаимодействует с преградой с начальной скоростью v_0 под углом α (угол между продольной осью ударника и нормалью n к преграде). В начальный момент времени $t=0$ направление вектора скорости совпадает с продольной осью ударника. Рассмотрен диапазон скоростей взаимодействия 400–1000 м/с и углов встречи 0–70°. На контактных поверхностях между ударником и преградой реализованы условия скольжения без трения, на контактных поверхностях между слоями преграды – условия «слипания».