

УДК669.295:621.431.7

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСХОДНЫХ ЛИТЫХ
ЗАГОТОВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОЗЕРНА В ТИТАНЕ**

н. с. Д. В. Распорня, д. т. н., доц. А. В. Овчинников*,

к. т. н. Т. А. Коваленко**

Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина,

**Запорожский национальный технический университет,*

***АО «Мотор Сич»*

1. Актуальность и цель работы

В условиях повышения требований к уровню механических свойств конструкционных материалов, применяемых для изготовления высоконагруженных деталей, в последние годы получило развитие новое направление в материаловедении – наноструктурирования [1]. Среди технологий наноструктурирования для титановых сплавов практической ценностью обладает интенсивная пластическая деформация (ИПД), позволяющая формировать как нано-, так и субмикроструктурную (СМК) структуру и существенно повысить их механические свойства [2]. На данном этапе ИПД находит все более широкое внедрение в машиностроении и прогрессируют в исследовательских работах. В производственном аспекте это обусловлено необходимостью обеспечения минимальных трудо-, материально- и энергозатрат при изготовлении полуфабрикатов с СМК структурой. Сократить указанные расходные статьи возможно, отказавшись от применения готового прутка в качестве исходной заготовки для ИПД [3; 4]. Замена исходных для ИПД заготовок, вырезанных из стандартных прутков, на заготовки из слитков может стать основой альтернативной технологией изготовления полуфабрикатов с повышенными механическими свойствами, что было показано в ряде работ [5; 6]. Важной проблемой является структурное состояние исходных заготовок.

Известно, что титановые сплавы могут быть выплавлены с применением различных технологий: вакуумно-дуговой (ВДП), электронно-лучевой (ЭЛП) и электрошлакового способа выплавки (ЭШП). Метод выплавки влияет на характер кристаллизации металла, на параметры структуры слитков, распределение примесей, размер зерна и механические свойства [7–9]. На данном этапе не исследованным остается влияние структуры исходного титанового слитка на эффективность реализации процесса ИПД и его режимы, на количество деформационных переделов, необходимых для формирования СМК структуры.

Таким образом, целью настоящей работы являлось определение влияния параметров структуры исходных слитков на формирование субмикроструктурного зерна в титане ВТ1-0 интенсивной пластической деформацией.

2. Методика и оборудование проведенных исследований

Исследовали слитки титана технической чистоты марки ВТ1-0, выплавленных с применением технологий ВДП, ЭШП и ЭЛП. Электрод получали прессованием титана губчатого марки ТГ110. Слитки подвергались

обточке для удаления дефектов поверхности и усадочной раковины. В качестве исходной деформируемой заготовки применяли прутки $\varnothing 60$ мм (ОСТ 190266). Химический состав слитков соответствовал требованиям ОСТ 190013 для титана ВТ1-0. Интенсивную пластическую деформацию осуществляли методом винтовой экструзии (ВЭ) по технологии, разработанной ДонФТИ им. А. А. Галкина. Особенности геометрии канала матрицы обеспечивали идентичность начальной и конечной форм и размеров обрабатываемой заготовки, что позволило осуществлять ее многократную экструзию с целью накопления деформации. Максимальная величина деформации за один проход при ВЭ составляла $\epsilon = 2$ [8]. Количество проходов при ВЭ изменялось от 1 до 7. Механические характеристики определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84 на машине INSTRON-8801. Исследование микроструктуры проведено на шлифах, отобранных из различных частей слитков, с применением микроскопа отраженного света «Observer.D1m» («Carl Zeiss») и электронного микроскопа JSM-6360LA, оснащенного приставкой для проведения энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

3. Результаты исследования, их обсуждение

Как известно, равномерность течения металла при пластической деформации зависит главным образом от химического состава и морфологии структуры материала, что особенно актуально для преобразования грубой литой структуры титановых слитков в мелкозернистую. Это обусловлено тем, что содержание химических элементов в титановом слитке может колебаться не только в различных его частях, но и по осям дендритов, что затрудняет однородное упрочнение металла методами деформационной обработки [9; 10]. Кроме того, затрудненная деформация литых титановых заготовок в процессе ИПД, осуществляемого по единому режиму независимо от способа их выплавки, может быть связана с анизотропией свойств слитков, характерной для α -титана: наименьшей прочностью и пластичностью крупнопластинчатая структура обладает в направлении, перпендикулярном пакету пластин [11]. Поэтому метод и технология выплавки, определяющие равномерность распределения компонентов и содержание примесей в металле, различия в морфологии и толщине границ структурных составляющих литого титана, оказывают существенное влияние на эффективность реализации ИПД при получении деформируемой заготовки.

Изучение литой структуры титана и закономерностей ее формирования позволило определить основные параметры, отрицательно влияющие на деформируемость литого металла и проанализировать возможные пути ее оптимизации. Так, микроструктура ВДП слитка после охлаждения от температур β -области представлена β -превращенными зернами размерами до 250 мкм с пластинчатым внутриверным строением α -фазы. Ширина α -пластин составляла 10...20 мкм, границы пластин тонкие (0,5...1 мкм), имели неправильную «зубчатую» форму [12], что характерно для достаточно медленного охлаждения (рис. 1 а). Микроструктура ЭШП слитка (рис. 1 б) отличалась от слитка ВДП отсутствием четко видимых границ β -превращенных зерен и большей разориентированностью α -пластин. Причем

ширина α -пластин в ЭШП слитке составляла 5...7 мкм, что в 2 раза меньше по сравнению с α -пластинами в слитке ВДП.

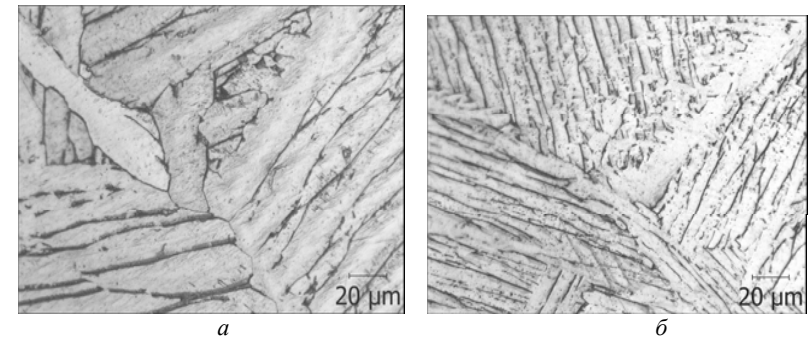


Рис. 1. Микроструктура слитков, выплавленных с применением различных технологий, 500 $^{\circ}$: а – ВДП; б – ЭШП

По своему строению микроструктура ЭЛП слитка аналогична выше рассмотренным структурам – состояла из α -пластин с различной кристаллографической ориентировкой, образующихся при охлаждении из температур β -области. Однако, размеры структурных элементов титана, выплавленного методом ЭЛП, существенно отличались от слитков ВДП и ЭШП: величина первичных β - зерен находилась в пределах 450 мкм, ширина α -пластин – 30...50 мкм, толщина границ α -пластин – до 2,5 мкм (рис. 2 а). Как указывалось в работе [7], в титановых сплавах выявить дендритное строение сложно, так как эти сплавы имеют узкий температурный интервал кристаллизации и длительно пребывают при высоких температурах в процессе охлаждения. При исследовании микроструктуры в отраженных электронах в ЭЛП слитке выявлены границы дендритов, ориентированные перпендикулярно более утолщенным границам α -пластин (рис. 2 б), что свидетельствовало о весьма медленном процессе кристаллизации металла при ЭЛП.

Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что по границам α -пластин в слитках титана исследуемых способов выплавки в виде прослоек располагались преимущественно примеси железа (рис. 3).

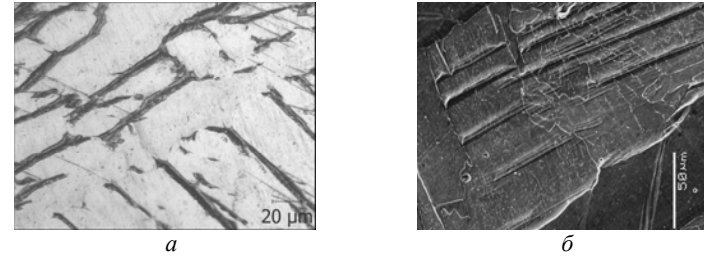
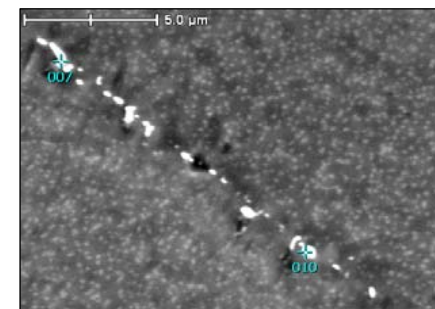


Рис. 3. Микроструктура слитка, выплавленного по технологии ЭЛП:
а – оптика, 500 \times ; б – РЭМ, 200 \times



№ точки	Ti	Fe	Всего, %
007	99,52	0,48	100
010	99,67	0,33	100

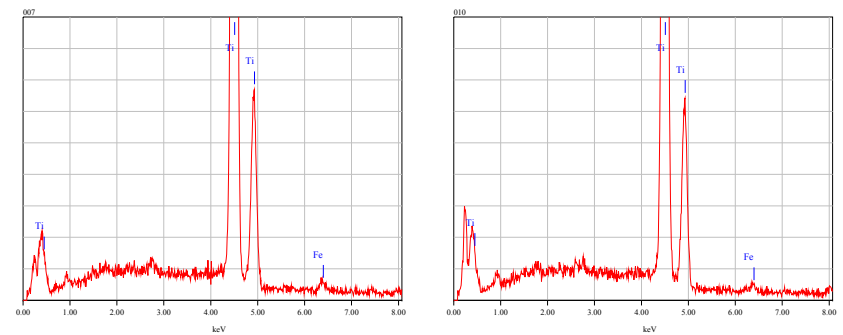


Рис. 4. Распределение элементов в структуре ЭШП слитка титана BT1-0
и содержание элементов в анализируемых областях структуры, 8 000 \times

Таким образом, к особенностям структуры в слитках титана вне зависимости от способа выплавки можно отнести: крупнозернистость, неоднородности химического состава и структуры, грубо пластинчатое внутризеренное строение, вызванное значительным перегревом жидкого металла и малой скоростью кристаллизации. Проведенный металлографический анализ позволил выделить среди рассмотренных в исследовании технологий слитки электронно-лучевого переплава, которым кроме перечисленных характеристик присущи наибольшие значения ширины α -пластин и толщины прослоек по их границам, в связи с чем необходимо отработать и уточнить режимы последующей деформационной обработки литого титана.

Влияние параметров исходной структуры титана ВТ1-0 на формирование СМК структуры в процессе ИПД прослеживалось при сравнении исходной литой титановой заготовки и вырезанной из стандартного горячекатаного прутка. Технология выплавки титана, применяемого для изготовления прутка (ОСТ 190266), в данном случае идентична с исходной для ИПД литой заготовкой – ВДП.

Микроструктура исходного прутка характеризовалась наличием равноосных рекристаллизованных зерен α -фазы размерами до 60 мкм – соответствовала отожженному состоянию титана ВТ1-0 (рис. 5 а). В структуре заготовки, вырезанной из титанового слитка, пластины α -фазы толщиной 12...20 мкм собраны в колонии, располагались по телу β -превращенных зерен (рис. 5 б).

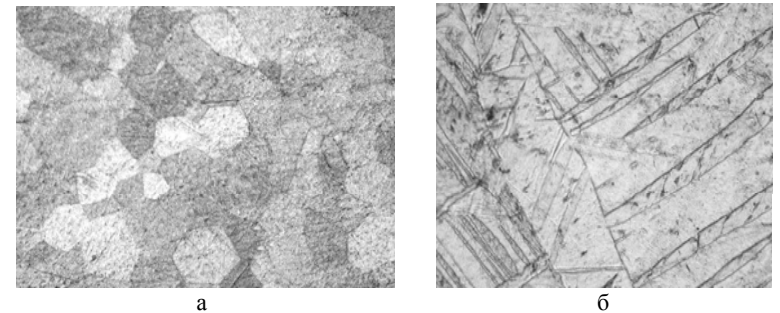


Рис. 5. Микроструктура исходных заготовок из титана ВТ1-0, 500 \times : а – пруток; б – слиток ВДП

Заготовку из прутка подвергали винтовой экструзии ($T = 250$ °С, давление прессования $P_1 = 2\ 390$ МПа, противодавление $P_2 = 200$ МПа, угол наклона канала матрицы $\beta = 45^\circ$) пятикратно, что позволило осуществить накопление логарифмической степени деформации величиной до 10 единиц без изменения исходных размеров и формы заготовки (рис. 6 а). В то же

время, ИПД исходной литого титана по идентичным прутку режимам привела к разрушению заготовки уже после 2-го прохода (рис. 6 б).

Для установления причины разрушения литой заготовки и определения механизмов деформации зерен титана в процессе ВЭ исследовали микроструктуру литой и прутковой заготовок после каждого прохода.

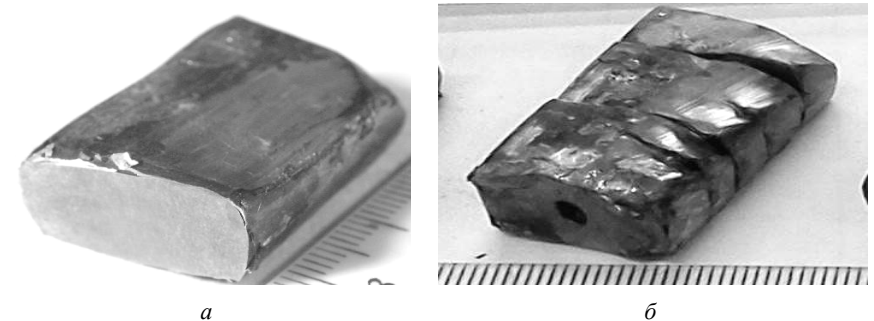


Рис. 6. Вид заготовок после винтовой экструзии титана BT1-0 в различном исходном состоянии: а – исходная заготовка – пруток; б – исходная заготовка – слиток ВДП

Анализ микроструктуры образцов после ВЭ показал, что после 2-х проходов α -пластины в литой и зерна в прутковой заготовках деформировались и вытягивались вдоль направления течения металла. Наибольшее формоизменение испытывали пластины, расположенные перпендикулярно этому направлению. После 4-х проходов в образцах с исходным деформированным состоянием наблюдалось дробление внутризеренной структуры. Дробление α -пластин и зерен на отдельные вытянутые фрагменты, вероятно, связано с перерезанием и разделением их в местах сильной локализации сдвиговой деформации. После 5-го прохода, зерна α -фазы в структуре образцов, изготовленных из прутка были примерно одной величины – 2...3 мкм. Последующие два прохода при ВЭ вызывали дальнейшее дробление структурных составляющих до СМК размеров (0,4...1 мкм) (рис. 7 а).

При фрактографическом исследовании на поверхности разрушения заготовки, вырезанной из слитка, обнаружено преобладание хрупких площадок, что свидетельствовало о низкой пластичности. В связи с особенностями структуры и характером разрушения слитков, опытным путем уточнен режим винтовой экструзии непосредственно для заготовок из ВДП слитков: увеличено общее количество проходов и повышена температура первых четырех проходов с 350 °С до 550 °С, далее – при 450 °С (дважды) и последние два прохода, формирующие субмикрозеренную структуру, осуществляли при 350 °С. В результате деформации по выбранному режиму

реализована ВЭ литой заготовки с формированием однородной СМК структуры (рис. 7 б).

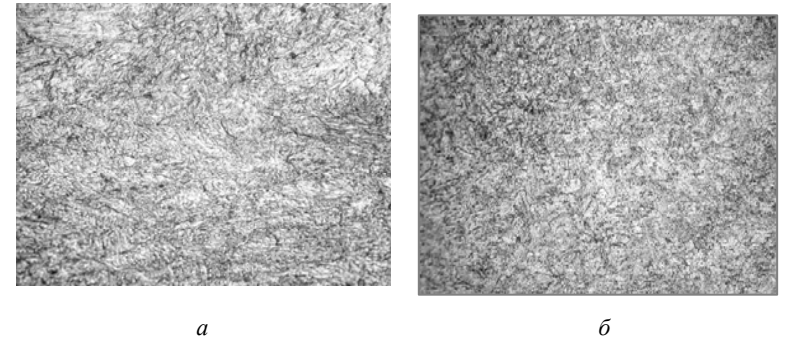


Рис. 7. Микроструктура заготовок после ИПД с применением различных исходных заготовок из титана ВТ1-0, 500°: а – пруток; б – слиток ВДП

При исследовании механических свойств установлено, что, после 7-ми проходов, прочность образцов из сплава ВТ1-0 с исходной деформируемой структурой повысилась с 426 до 658 МПа (до 1,5 раз), а с исходной литой структурой – с 350 до 610 МПа (до 2-х раз). Таким образом, разница в упрочнении между образцами с исходным литым и деформируемым состоянием составляла не менее 5 %. Поэтому дальнейшее увеличение количества проходов сочли нецелесообразным. Таким образом, интенсивная пластическая деформация методом винтовой экструзии позволяет получать СМК структуру во всем объеме заготовок как с исходным литым, так и деформированным состоянием.

Технологический процесс изготовления прутков включает десятки операций, таких как: обточка и порезка слитков на заготовки, нагрев заготовок до температур β -, $\alpha+\beta$ -температурных областей, прокатка и волочение при заданных температурах, последующая механическая обработка, окончательная термообработка. Такая технология получения титановых прутков обуславливает их высокую стоимость. Использование при ВЭ в качестве исходных заготовок литого титана ВТ1-0 вместо прутков позволит сократить технологическую цепочку получения СМК структуры на десятки операций.

Результаты исследования показали, что слитки титана, выплавленные с применением различных технологий, имеют существенные отличия по параметрам структуры, что обусловлено условиями кристаллизации металла. Размеры структурных составляющих и толщина границ зерен определяли свойства литого титана: их увеличение способствовало снижению пластичности и развитию хрупкого разрушения в процессе последующей деформации металла. Поэтому необходимо учитывать структурные параметры слитков титана различных способов выплавки при реализации

ИПД, в соответствии с которыми необходимо корректировать режимы последующей деформации.

Выводы

1. Параметры микроструктуры слитков титана BT1-0, выплавленных по технологии ВДП, ЭШП и ЭЛП, различны: наиболее дисперсное строение имел ЭШП слиток, более крупнопластинчатое – металл ЭЛП слитка.

2. Для эффективной реализации ИПД необходимо учитывать влияние способа выплавки слитков, полученных с применением различных технологий, и уточнять режимы деформации для литых заготовок различных способов выплавки.

3. Применение в качестве исходных заготовок для ИПД слитков (ВДП, ЭШП либо ЭЛП способов выплавки) может стать основой более экономичной альтернативной технологии изготовления деформируемых титановых полуфабрикатов для высоконагруженных деталей.

Литература

1. Добаткин С. В. Получение объемных металлических нано- и субмикро-кристаллических материалов методом интенсивной пластической деформации / С. В. Добаткин, А. М. Арсенкин, М. А. Попов [и др.] // МиТОМ. – Д. : ПГАСА, 2005. – № 5. – С. 29–34.

2. Овчинников А. В. Оценка эффективности применения интенсивной пластической деформации для получения нанокристаллической структуры в титановом сплаве BT3-1 / А. В. Овчинников, Д. В. Павленко, А. Я. Качан [и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – № 1. – С. 27–31.

3. Александров А. В. Особенности развития современного рынка титана / А. В. Александров // Титан в СНГ-2007. – 2007. – С. 7–10.

4. Тэлин В. В. Анализ тенденций развития технологий производства и потребления титана / В. В. Тэлин, В. И. Иващенко, И. Ф. Червонный [и др.] // Титан. – № 2. – 2005. – С. 62–68.

5. Коваленко Т. А. Изготовление заготовок деталей ГТД из $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов с применением технологии ИПД / Т. А. Коваленко, А. В. Овчинников / Титан-2012: производство и применение (Запорожье, 2012; Запорізький національний технічний університет). – 2012. – С. 96–98.

6. Овчинников А. В. Получение заготовок субмикрокристаллических $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов из слитков / А. В. Овчинников, Т. А. Коваленко // Теория и практика металлургии. – 2010. – № 5–6. – С. 11–15.

7. Бочвар Г. А. Формирование структуры титановых сплавов в литом состоянии и пути ее оптимизации / Г. А. Бочвар // Технология легких сплавов. – № 1–4. – 2005. – С. 46–51.

8. Бейгельзимер Я. Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов и др. – Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.

9. Ночовная Н. А. Исследование влияния геометрических условий промышленнойковки на характер фрактограмм изломов высокопрочного титанового сплава BT43 / Н. А. Ночовная, Д. И. Динмухаметова, А. И. Хорев [и др.] // Технология легких сплавов. – № 1. – 2013. – С.58–61.
10. Бережной В. Л. Анализ и формализация представлений о неравномерности деформации для технологического развития прессования / В. Л. Бережной // Технология легких сплавов. – № 1. – 2013. – С.40–56.
11. Дроздовский Б. А., Проходцева Л. В., Новосильцева Н. И. Трещиностойкость титановых сплавов. – М. : Металлургия, 1983 – 192 с.
12. Белов С. П., Брун М. Я., Глазунов С. Г. и др. Титановые сплавы. Металловедение титана и его сплавов. – М. : Металлургия, 1992. – 352 с.

УДК669.295:621.431.7

Влияние структурных параметров исходных литых заготовок на формирование субмикрзерна в титане / Д. В. Распорня, А. В. Овчинников, Т. А Коваленко // Металознавство та термічна обробка металів: науковий та інформ. журнал // Д. : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 3. – С. –. – Рис. 7. – Бібліогр.: (12 назв).

В работе установлено, что различия в параметрах структуры литого титана VT1-0, выплавленного по технологиям ВДП, ЭШП и ЭЛП, обусловлены условиями кристаллизации, что оказывало влияние на деформируемость металла при последующей интенсивной пластической деформации. Рекомендовано назначать режимы ИПД с учетом параметров структуры исходной заготовки.

У роботі встановлено, що відмінності в параметрах структури литого титану VT1-0, виплавленого за технологіями ВДП, ЕШП і ЕЛП, обумовлені умовами кристалізації, що мало вплив на деформованість металу при подальшій інтенсивній пластичній деформації. Рекомендовано призначати режими ПД з урахуванням параметрів структури вихідної заготовки.

In this paper we found that the differences in the structure of cast titanium VT1-0 smelted Technology VAR, ESR and EBR, due to crystallization conditions that influenced the deformability of the metal in the subsequent severe plastic deformation. Recommended to administer SDI modes within the parameters of the structure of the original piece.