

УДК 669.295:621.431.75

Д. В. Распорня<sup>1</sup>, д-р техн. наук А. В. Овчинников<sup>2</sup>, В. Г. Шевченко<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук Т. А. Коваленко<sup>2</sup><sup>1</sup> Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, г. Донецк;<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВЫПЛАВКИ СЛИТКОВ ТИТАНА НА ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

*В работе исследованы слитки титана BT1-0 различных способов выплавки в литом состоянии и после интенсивной пластической деформации (ИПД). Установлено, что различия в параметрах структуры литого титана, выплавленного по различным технологиям, обусловлены условиями кристаллизации, что влияло на деформируемость металла при последующей ИПД. Рекомендовано назначать режимы ИПД с учетом способа выплавки титана.*

**Ключевые слова:** слиток, титан, выплавка, субмикроструктурная структура.

### Актуальность и цель работы

В настоящее время необходимость повышения физико-механических свойств конструкционных металлов и сплавов, применяемых для изготовления деталей ответственного назначения, обусловила развитие нового направления в материаловедении – наноструктурирование [1]. Как показал анализ публикаций последних лет, для титановых сплавов практической ценностью обладают технологии интенсивной пластической деформации (ИПД), позволяющие формировать как нано-, так и субмикроструктурную (СМК) структуру и существенно повысить их механические свойства [2]. На данном этапе технологии ИПД находят 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 основной альтернативной технологией изготовления полуфабрикатов с повышенными механическими свойствами, что было показано в ранее проведенных работах [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 структуру слитков, распределение примесей, размер зерна и механические свойства [7–9]. На данном этапе не исследованным является влия-

ние способа выплавки исходного слитка титана на эффективность реализации процесса ИПД и его режимы, на количество деформационных переделов, необходимых для формирования СМК структуры в титановых сплавах.

Целью настоящей работы являлось определение влияния способа выплавки титановых слитков на эффективность формирования субмикроструктурной структуры методом интенсивной пластической деформации.

### Методика и оборудование для проведения исследований

Исследовали слитки титана технической чистоты марки BT1-0, выплавленные с применением технологий ВДП, ЭШП [10] и ЭЛП [11]. Электрод получали прессованием титана губчатого марки ТГ110. Слитки подвергались механической обработке для удаления дефектов поверхности и усадочной раковины. В качестве исходной деформируемой заготовки применяли прутки  $\varnothing 60$  мм (ОСТ 190266). Химический состав слитков, определенный спектральным анализом и методом аналитической химии по ГОСТ 1 9863.1-19863.13, соответствовал требованиям ОСТ 190013 для титана BT1-0. 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 больших величин деформации. Максимальная величина деформации за один проход при ВЭ составляла  $\epsilon = 2$  [12]. 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).

### 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 [13, 14]. 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  $\alpha$ -титана: наименьшей прочностью и пластичностью крупнопластинчатая структура обладает в направлении, перпендикулярном пакету пластин [15]. 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 основ-

ные параметры, отрицательно влияющие на деформируемость литого металла и проанализировать возможные пути ее оптимизации. Так, величина макрозерен слитка, выплавленного методом ВДП, в среднем составляла 3...4 мм (рис. 1, а). Макрозерна слитка ЭШП отличались меньшими размерами и составляли 1...3 мм (рис. 1, б). Величина макрозерен ЭЛП слитка превышала размеры ВДП и ЭШП слитков и составляла порядка 7...12 мм. При этом внутри макрозерен просматривались субзерна, по-видимому, представляющие собой разориентированные пачки пластин  $\alpha$ -фазы (рис. 1, в).

Микроструктура ВДП слитка после охлаждения от температур  $\beta$ -области представлена  $\beta$ -превращенными зернами размерами до 250 мкм с пластинчатым внутризерненным строением  $\alpha$ -фазы. Ширина  $\alpha$ -пластин составляла 10...20 мкм, границы пластин тонкие (0,5...1 мкм), имели неправильную «зубчатую» форму [16], что характерно для достаточно медленного охлаждения (рис. 2, а). Микроструктура ЭШП слитка (рис. 2, б) отличалась от слитка ВДП отсутствием четко видимых границ  $\beta$ -превращенных зерен и большей разориентированностью  $\alpha$ -пластин. Причем ширина  $\alpha$ -пластин в ЭШП слитке составляла 5...7 мкм, что в  $\sim 2$  раза меньше по сравнению с  $\alpha$ -пластинами в слитке ВДП. По своему строению микроструктура ЭЛП слитка аналогична выше рассмотренным структурам и представляла собой  $\alpha$ -пластины с различной кристаллографической ориентировкой, образующиеся при охлаждении от температур  $\beta$ -области. Однако размеры структурных элементов титана, выплавленного методом ЭЛП, существенно отличались от слитков ВДП и ЭШП. Величина первичных  $\beta$ -зерен находилась в пределах 450 мкм, ширина  $\alpha$ -пластин – 30...50 мкм, толщина границ  $\alpha$ -пластин – до 2,5 мкм (рис. 2, в).

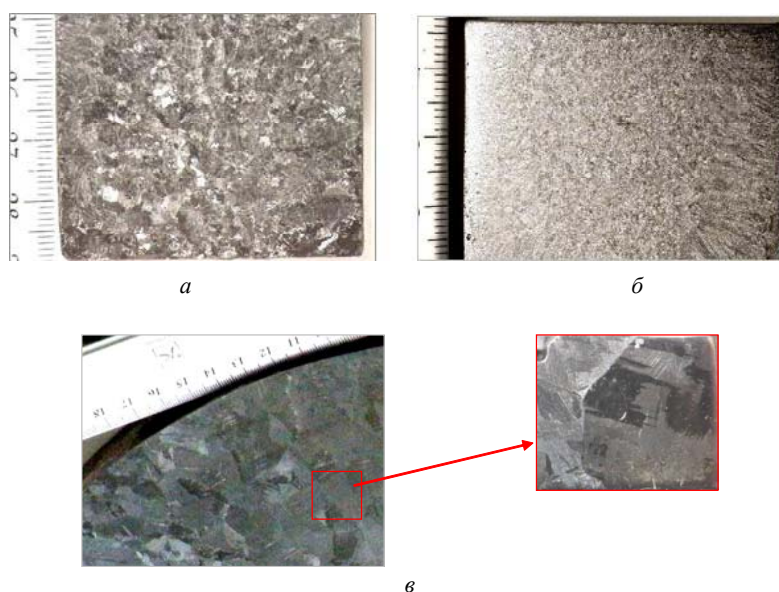


Рис. 1. Макроструктура слитков, выплавленных с применением различных технологий: а – ВДП; б – ЭШП; в – ЭЛП

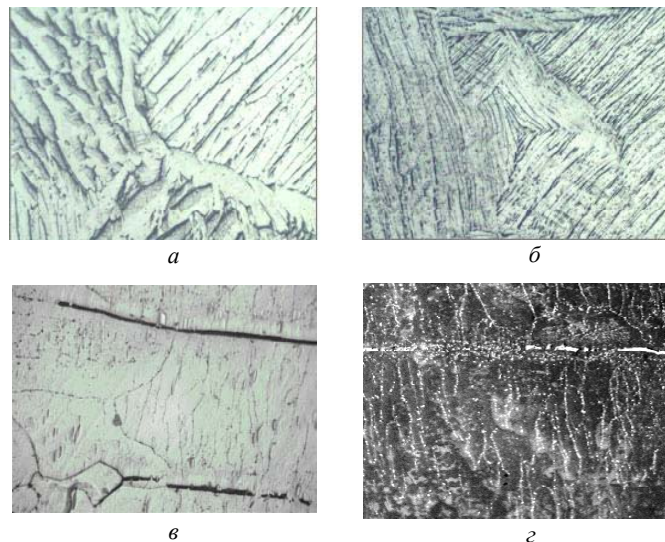


Рис. 2. Микроструктура слитков, виплавлених з використанням різних технологій : а – ВДП; б – ЭШП; в – ЭЛП; г – ЭЛП (растровое изображение); (а-в  $\square$   $\times$  500; г  $\times$  140)

Как указывалось в работе [7], в титановых сплавах выявить дендритное строение сложно, так как эти сплавы имеют небольшой температурный интервал кристаллизации и длительно пребывают при высоких температурах в процессе охлаждения. При исследовании микроструктуры только в ЭЛП слитке выявлены границы дендритов, ориентированные перпендикулярно утолщенным границам  $\alpha$ -пластин (см. рис. 2, в, г), что свидетельствовало о весьма медленном процессе кристаллизации металла при ЭЛП.

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

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

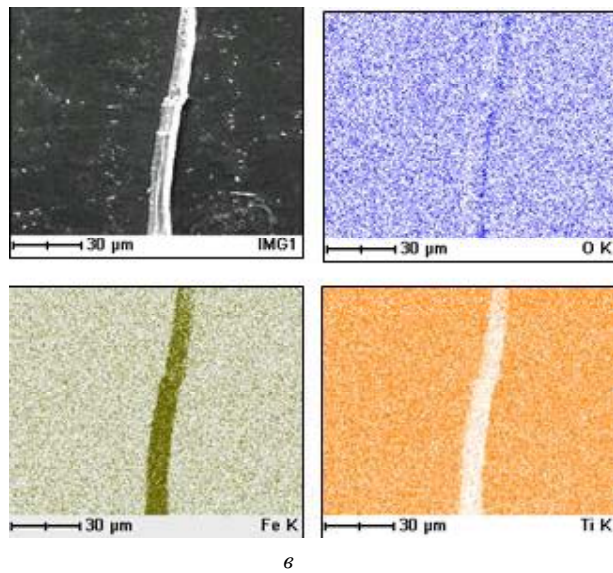
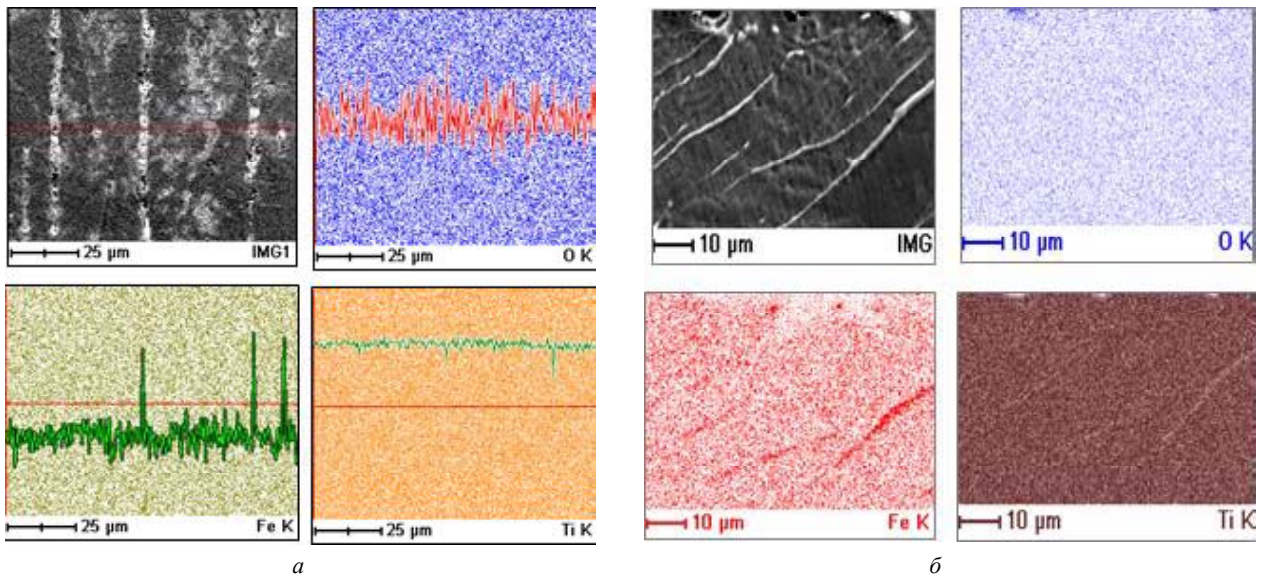
Влияние параметров исходной структуры титана ВТ1-0 на формирование СМК структуры в процессе ИПД прослеживалось при сравнении исходной литой титановой заготовки и вырезанной из стандартного горячекатаного прутка. Технология выплавки титана, применяемого для изготовления прутка (ОСТ 190266), в данном случае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

Микроструктура исходного прутка характеризовалась наличием равноосных рекристаллизованных зерен  $\alpha$ -фазы размерами до 60 мкм и соответствовала отожженному состоянию титана ВТ1-0 (рис. 4, а). В структуре заготовки, вырезанной из титанового слитка, пластины  $\alpha$ -фазы толщиной 12...20 мкм располагались внутри  $\beta$ -превращенных зерен (рис. 4, б).

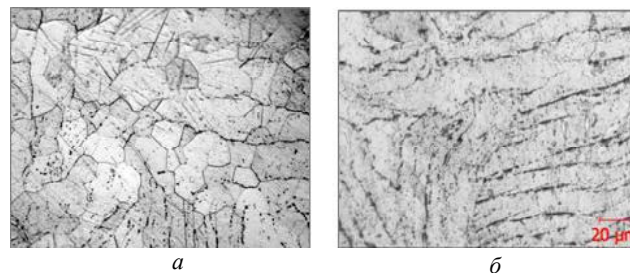
Заготовку из прутка подвергали винтовой экструзии ( $T = 250$  °С, давление прессования  $P_1 = 2390$  МПа, противодействие  $P_2 = 200$  МПа, угол наклона канала матрицы  $\beta = 45^\circ$ ) пятикратно, что позволило осуществить накопление логарифмической степени деформации величиной до 10 единиц без изменения исходных размеров и формы заготовки (рис. 5, а). В тоже время, ИПД исходной заготовки литого титана по идентичным пруткам режимам привела к разрушению уже после 2-го прохода (рис. 5, 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.

Анализ микроструктуры образцов после ВЭ показал, что после 2-х проходов  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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. 5, а).



**Рис. 3.** Энергодисперсионный рентгеноспектральный качественный микроанализ распределения элементов в слитках титана BT1-0: *а* – ВДП; *б* – ЭСП; *в* – ЭЛП



**Рис. 4.** Микроструктура исходных заготовок из титана BT1-0: *а* – пруток; *б* – слиток ВДП;  $\times 500$

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. Увели-

чено 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. 5, б).

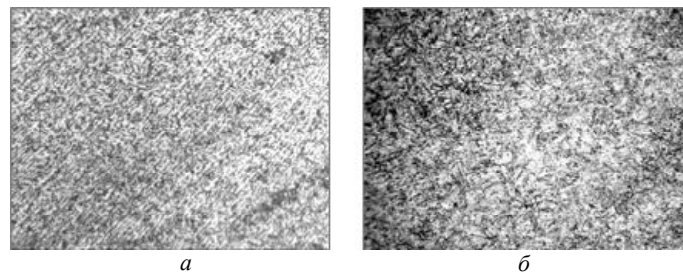


Рис. 5. Микроструктура заготовок после ИПД с применением различных исходных заготовок из титана BT1-0: а – пруток; б – слиток ВДП;  $\times 500$

При исследовании механических свойств установлено, что после 7 проходов прочность образцов из сплава BT1-0 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  $\beta$ -,  $\alpha + \beta$ - 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 BT1-0 вместо прутков позволит сократить технологическую цепочку получения СМК структуры.

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, полу-

ченных 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.

### Список литературы

1. Получение объемных металлических нано- и субмикрористаллических материалов методом интенсивной пластической деформации / [С. В. Добаткин, А. М. Арсенкин, М. А. Попов и др.] // МиТОМ. – 2005. – № 5. – С. 29–34.
2. 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 // Ti – 2007 в СНГ: сб. научн. тр. / Межгосударственная ассоциация Титан, Нац. Академия наук Укр., Запорожский титано – магниевый комбинат. – Киев, 2007. – С. 7–10.
4. Анализ тенденций развития технологий производства и потребления титана / [В. В. Тэлин, В. И. Иващенко, И. Ф. Червоный и др.] // Титан. – 2005. – № 2. – 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 : виробництво і застосування : тези доповідей III міжнар. наук.-техн. конф., 4–5 жовтня 2012 р., Запоріжжя. – Запоріжжя, 2012. – С. 96–98.
6. Овчинников А. В. Получение заготовок субмикрористаллических  $(\alpha + \beta)$ -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. – 2005. – № 1–4. – С. 46–51.
8. Патон Б. Е. Производство крупнотоннажных слитков титановых сплавов методом электронно-лучевой плавки / Б. Е. Патон, С. П. Тригуб, А. В. Ахонин // Титан. – 2010. – № 2. – С. 31–35.
9. Ахонин Д. С. Исследование распределения примесей в

- слитках титана электронно-лучевой плавки методами математического моделирования / Д.С. Ахонин, С. Н. Ратиев // *Металлургия : Наукові праці ДонНТУ*. – 2010. – № 12(177). – С. 301–308.
10. Рябцев А. Д. Электрошлаковый переплав металлов и сплавов под флюсами с активными добавками в печах камерного типа / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский // *Электрометаллургия*. – 2005. – № 4. – С. 3–25.
  11. Тригуб Н. П. Промышленная электронно-лучевая установка УЭ-5812 / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. Д. Корнейчук // *Современная электрометаллургия*. – 2007. – № 1. – С. 11–14.
  12. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / [Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Орлов Д. В., Сынков С. Г.]. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 85 с.
  13. Исследование влияния геометрических условий промышленнойковки на характер фрактограмм изломов высокопрочного титанового сплава ВТ43 / [Н. А. Ночовная, Д. И. Динмухаметова, А. И. Хореев и др.] // *Технология легких сплавов*. – 2013. – № 1. – С. 58–61.
  14. Бережной В. Л. Анализ и формализация представлений о неравномерности деформации для технологического развития прессования / В. Л. Бережной // *Технология легких сплавов*. – 2013. – № 1. – С. 40–56.
  15. Дроздовский Б.А. Трещиностойкость титановых сплавов / Б.А. Дроздовский, Л.В. Проходцева, Н.И. Новосильцева. – М.: *Металлургия*, 1983. – 192 с.
  16. Титановые сплавы. Металловедение титана и его сплавов / [С. П. Белов, М. Я. Брун, С. Г. Глазунов и др.]. – М. : *Металлургия*, 1992. – 352 с.

*Одержано 04.06.2014*

**Распорня Д.В., Овчинников О.В., Шевченко В.Г., Коваленко Т.О. Вплив способу виплавки злитків титану на формування субмікроструктурної структури інтенсивної пластичної деформації**

*В роботі досліджено зливки титану ВТ1-0 різних способів виплавки в литому стані та після інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Установлено, що відмінності в параметрах структури литого титану, виплавленого за різними технологіями, обумовлені умовами кристалізації, що впливало на деформуємість металу при наступній ІПД. Рекомендовано призначати режими ІПД з урахуванням способу виплавки титану.*

**Ключові слова:** *зливки, титан, виплавка, субмікроструктурна структура.*

**Raspornia D., Ovchinnikov A., Shevchenko V., Kovalenko T. Influence a melting titanium ingots on formation submicrocrystalline structure severe plastic deformation**

*Titanium BT1-0 ingots of various melting methods in as cast condition and after intencive plastic deformation (IPD) were investigated. It was ascertained that differences in structure parameters of as cast metal, produced by various melting methods, were caused by crystallization conditions that in turn influenced metal deformability during the following IPD. It was recommended to take into account melting methods of titanium while assigning IPD modes.*

**Key words:** *ingot, titanium, melting, submicrocrystalline structure.*