

УДК 669.295:621.745.755

М.М. Ворон, аспирант

Национальный Технический Университет Украины «Киевский политехнический институт»,

Инженерно-физический факультет, Проспект Победы 37, г. Киев, Украина, 030056

E-mail: mihail.voron@gmail.com

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ, ВЛИЯЮЩИХ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИТЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрены возможности управления структурой и свойствами титана и сплавов на его основе, полученных литейным методом электронно-лучевой гарнисажной плавки с электромагнитным перемешиванием расплава. На примере технически чистого титана проанализировано влияние технологических параметров плавки на структуру и свойства выплавляемого материала. Рассмотрены возможности управления свойствами литых титановых сплавов ВТ-5.

Ключевые слова: *титан и его сплавы, электронно-лучевая литейная технология, управление структурой и свойствами*

Титан и сплавы на его основе относятся к ряду современных и наиболее перспективных материалов в машиностроении, энергетике, авиакосмической промышленности, медицине, архитектуре и других сферах [1, 2], чем объясняется постоянный рост производства этих материалов во всем мире за последние несколько десятилетий. Украина увеличивает добычу титановых руд и переработку титановой губки, разработку переплавных и литейных технологий для титана и его сплавов. В Украине 90 % этой продукции имеет вид крупногабаритных и многотонных цилиндрических слитков или слябов [3]. Производство готовой продукции на базе отечественных предприятий слишком затратное и номенклатура готовых изделий ограничивается крупным прокатом, небольшим сортаментом поковок и штамповок, что не способствует выходу страны из состояния «сырьевой базы» и не позволяет удовлетворять потребности внутреннего рынка для развития авиакосмической промышленности, оборонного производства, топливно-энергетического комплекса и других крупных потребителей титана. Частичное решение проблемы возможно за счет развития предприятий, которые бы использовали технологии фасонного литья и производства полуфабрикатов массой до 1 т широкого сортамента [4]. Это позволило бы сократить и упростить дальнейшие механическую, термическую и др. виды обработки, что, в свою очередь, позволяет снизить стоимость готовой продукции.

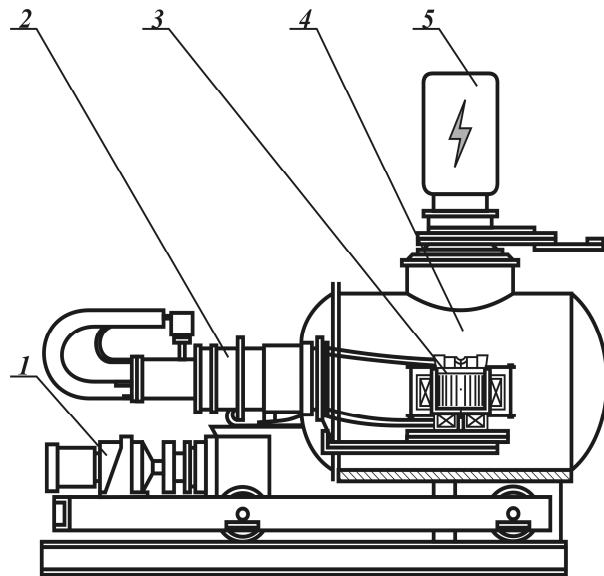
Получение фасонных отливок в виде полуфабрикатов и готовых изделий из титана и его сплавов слабо развито из-за отсутствия надежных технологических решений, которые обеспечивали бы достаточное качество литья и комплекс структурно-механических свойств отливок. Разработка таких технологий рассматривается многими специалистами как важнейшая задача в сфере производства титановой продукции для всех областей ее потребления [5, 6].

Высокое качество малогабаритных отливок и контроль структурных параметров (а следовательно и некоторых механических свойств) возможно с использованием методов физического воздействия на расплав непосредственно в процессе плавки [7]. Технологией, которая не требует специальных надстроек и при этом реализует некоторые методы физического воздействия на расплав, является технология электронно-лучевой гарнисажной плавки с электромагнитным перемешиванием расплава (ЭЛГП с ЭМП). Метод ЭЛГП представляет собой вакуумную литейную технологию, которая предназначена для плавки тугоплавких и высокорекреакционных металлов, и широко применяется для выплавки ряда фасонных отливок из титана и его сплавов. За годы применения технологии было обнаружено, что она способна влиять на структурообразование металла посредством специфической обработки расплава, которая заключается в совместном действии электронно-лучевой обработки и электромагнитного перемешивания расплава [8].

Цель исследований – оценка влияния технологических факторов на свойства титановых сплавов.

Для исследования возможностей управления структурными параметрами титана и сплавов на его основе, выплавляемых методом ЭЛГП с ЭМП расплава, проводились опыты, целью которых было определить технологические факторы, влияющие на изменение физико-структурных параметров металла. В качестве опытных материалов использовали чистый титан марки ВТ1-0 и α -сплав ВТ-5. Сплав ВТ-5 получали в ходе плавки путем добавления в расплав алюминия. Изучались следующие свойства полученных отливок: макроструктура, микроструктура и твердость.

Опытные плавки проводились на литейной установке ЭЛЛУ-4, показанной на рисунке 1. С использованием принципиально похожих режимов повышения мощности луча и различном времени существования ванны расплава и времени действия ЭМП. Металл заливали в графитовые и стальные формы для получения цилиндрических слитков \varnothing 55, 65, 75 мм.



- 1 – механизм перемещения крышки;
- 2 – механизм поворота тигля;
- 3 – тигель;
- 4 – вакуумная камера;
- 5 – электронно-лучевая пушка

Рисунок 1 – Общий вид и схематическое изображение установки ЭЛЛУ-4

В ходе исследований было проведено более двадцати экспериментальных плавки и сделаны макро- и микроструктурный анализы полученных образцов, измерение их твердости и сравнительный анализ зависимости структурных показателей от технологических факторов плавки.

На рисунке 2 представлены некоторые структуры исследованных образцов сплава ВТ1-0, а в таблице 1 указаны значения размерных параметров соответствующих структур и их твердость. Как видим, структура и свойства чистого титана, полученного по разным технологическим режимам могут сильно отличаться. Это свидетельствует о возможности управления структурными и механическими характеристиками литых изделий, полученных методом ЭЛП с ЭМП расплава, путем изменения тех или иных технологических параметров плавки.

Управление структурой металла (как макро- так и микроструктурой) позволяет изменять такие технологические свойства как обрабатываемость давлением в различных температурных условиях и обрабатываемость резанием (для многофазных сплавов). Структурночувствительными механическими свойствами металлов являются прочность, пластичность и ударная вязкость [9,10]. Следовательно, получение заданной структуры литого металла во многом определяет его комплекс механических свойств и возможность их изменить без дополнительной обработки.

Как видно на рисунке 2, на цилиндрических темплатах отсутствует привычная для литого металла трехзонная структурная картина. Макроструктура полученных образцов скорее напоминает деформированный металл или отливку после гомогенизационного отжига. Такие показатели дают право предполагать, что технология ЭЛП с ЭМП расплава может применяться для производства полуфабрикатов и литых изделий с заданным комплексом механических свойств и структурных параметров.

В ходе опытов оценивалось всего одно механическое свойство – твердость (по Бринелю) НВ. Согласно [11,12], для однофазных сплавов, коими являются наши опытные сплавы, твердость НВ коррелирует с прочностью и пластичностью материалов и может применяться для их приблизительной косвенной оценки. Расчетные значения прочности некоторых образцов имеют значения близкие к свойствам деформированного материала.

Определение влияния технологических факторов плавки на формирование структуры и свойств литого металла проводился с использованием корреляционного анализа [13]. При выборе наиболее значимых факторов использовались расчеты парных коэффициентов корреляции. Значения коэффициентов показывали степень и направление влияния соответствующих факторов, как по отдельности так и попарно, на параметры структуры и твердость.

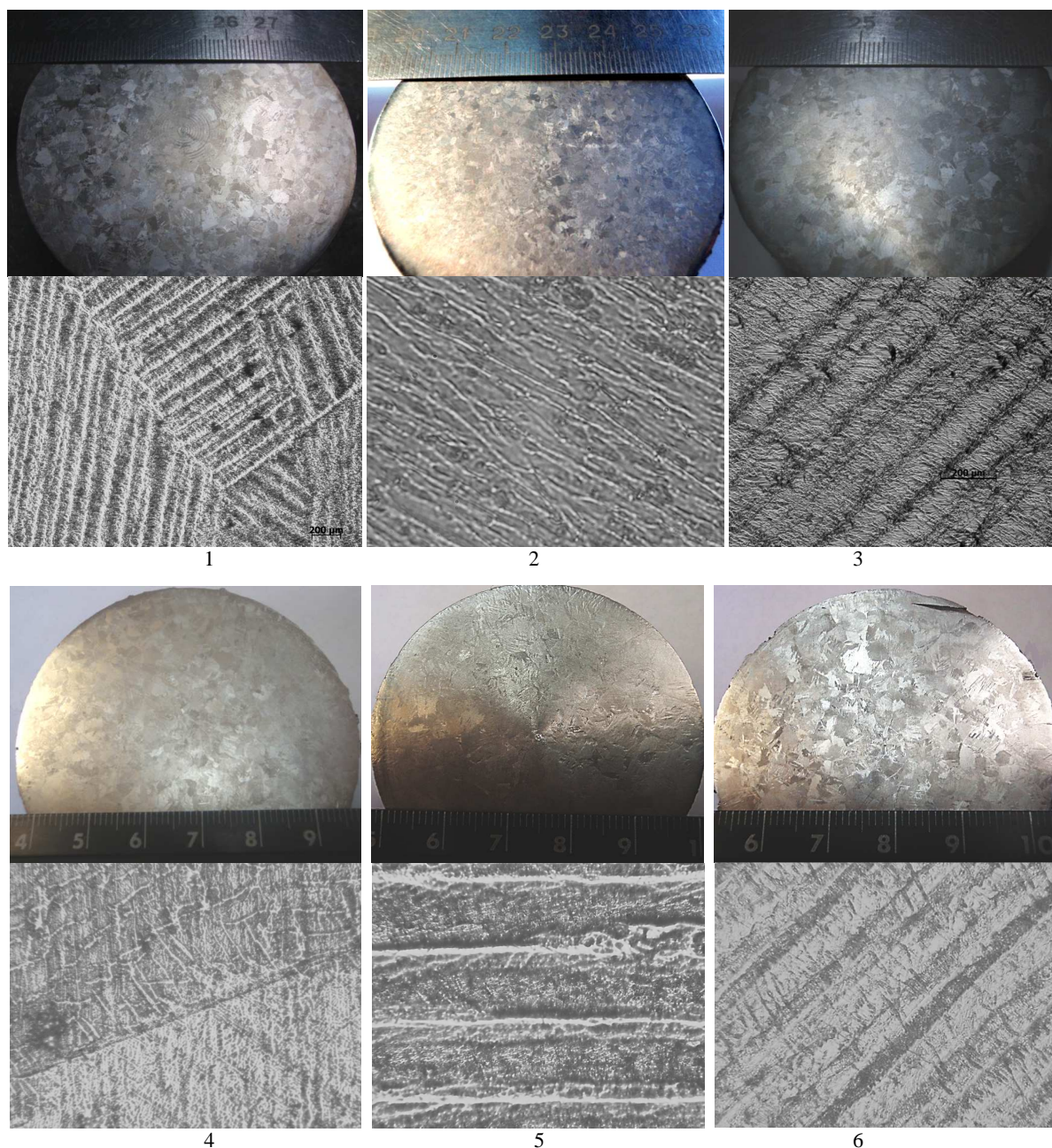


Рисунок 2 – Макро- и микроструктуры опытных литых заготовок сплава ВТ1-0

Таблица 1 – Структурные параметры и твердость опытных литых заготовок сплава ВТ1-0

Номер отливки	Средний размер макрозерна, мм	Размер микрозерна, мкм	Твердость НВ10 ⁻¹ МПа	Расчетная прочность σ_B , МПа
1	2,5	90	197	387,8
2	1,25	55	174	355,6
3	2,5	85	163	340,2
4	2	60	269	488,6
5	3	70	210	406
6	2	70	285	511
VT1-0 *	–	–	131-163	315-355

* свойства литого сплава ВТ1-0 по ГОСТ 19807-91, ГОСТ 26492-85

Технологические факторы, которые исследовались: два последних изменения мощности электронного луча и продолжительность нагрева металла на этих мощностях, длительность работы

ЭМП, температура охлаждающей тигель воды (как показатель перегрева), масса слитого металла, диаметр формы, продолжительность слива и вакуум в момент слива. В таблице 2 приведены обозначения факторов и откликов эксперимента.

Таблица 2 – Обозначение факторов и откликов эксперимента

Обозначение фактора/отклика	Название и единицы измерения фактора/отклика
X1	Время действия ЭМП, мин
X2	Продолжительность режима 1, мин
X3	Мощность режима 1, кВт
X4	Продолжительность режима 2, мин
X5	Мощность режима 2, кВт
X6	ΔT охлаждающей воды, °C
X7	Масса слитого металла, кг
X8	Диаметр формы, мм
X9	Продолжительность слива металла, с
X10	Вакуум в момент слива
Y1	Твердость, НВ
Y2	Размеры макрозерен, мм
Y3	Размеры микрозерен, мкм

Далее был проведен регрессионный анализ с использованием многомерного метода наименьших квадратов, и для каждого отклика (параметры структуры и твердость) были построены уравнения регрессии:

$$Y1 = 474,712 - 0,77 \cdot X3 - 0,816 \cdot X5 - 13,427 \cdot X6 + 31,615 \cdot X7 - 3,635 \cdot X8 + 3,215 \cdot X9, \quad (1)$$

$$Y2 = 5,6692 - 0,07169 \cdot X4 - 0,159 \cdot X6 - 0,0784 \cdot X7 - 0,153 \cdot X9 + 0,02 \cdot X10, \quad (2)$$

$$Y3 = 378,645 - 3,747 \cdot X1 - 6,75 \cdot X2 + 0,959 \cdot X3 - 0,373 \cdot X5 + 0,235 \cdot X6 + 12,639 \cdot X7 - 5,258 \cdot X8 - 1,987 \cdot X9. \quad (3)$$

Корреляционный и регрессионный анализы дают широкое представление о том, какие из исследуемых свойств чувствительны (и в какой степени) к влиянию того или иного технологического фактора. Для титановых сплавов общие закономерности воздействия на структуру и свойства сохраняются, но влияние легирующих элементов изменяет процесс структурообразования и интервалы значений структурных параметров и твердости практически исчезают. Доказательством тому служат опыты по выплавке сплава ВТ-5.

На рисунке 3 представлены макро- и микроструктуры образцов сплава ВТ-5, которые плавил подобно сплаву ВТ1-0. Отливки имели разное содержание алюминия – около нижнего и верхнего предела концентрации для данного сплава. Режимы плавки были практически идентичны и отличались только тем, что сплав 2 (с большим содержанием алюминия) был в момент слива чуть более перегрет чем сплав 1. Это привело к образованию чуть более крупной микроструктуры сплава 2 и, не смотря на большую степень легирования, его твердость оказалась меньше чем у сплава 1.

Этот опыт доказывает, что в условиях использования технологии ЕЛГП с ЭМП расплава могут быть реализованы механизмы выборочного регулирования некоторых механических свойств. Структурные параметры, как показал эксперимент, меняются незначительно, но оказывают заметное влияние на свойства. Данные свойств и структурных параметров образцов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Структурные параметры и твердость опытных литых заготовок сплава ВТ-5

Номер отливки	Средний размер макрозерна, мм	Размер микрозерна, мкм	Твердость НВ, 10^{-1} МПа	Расчетная прочность σ_b , МПа
1	1	8	371	672
2	1,2	10	302	639
ВТ-5 *	–	–	229-321	636-654

* свойства литого сплава ВТ-5 по ГОСТ 19807-91

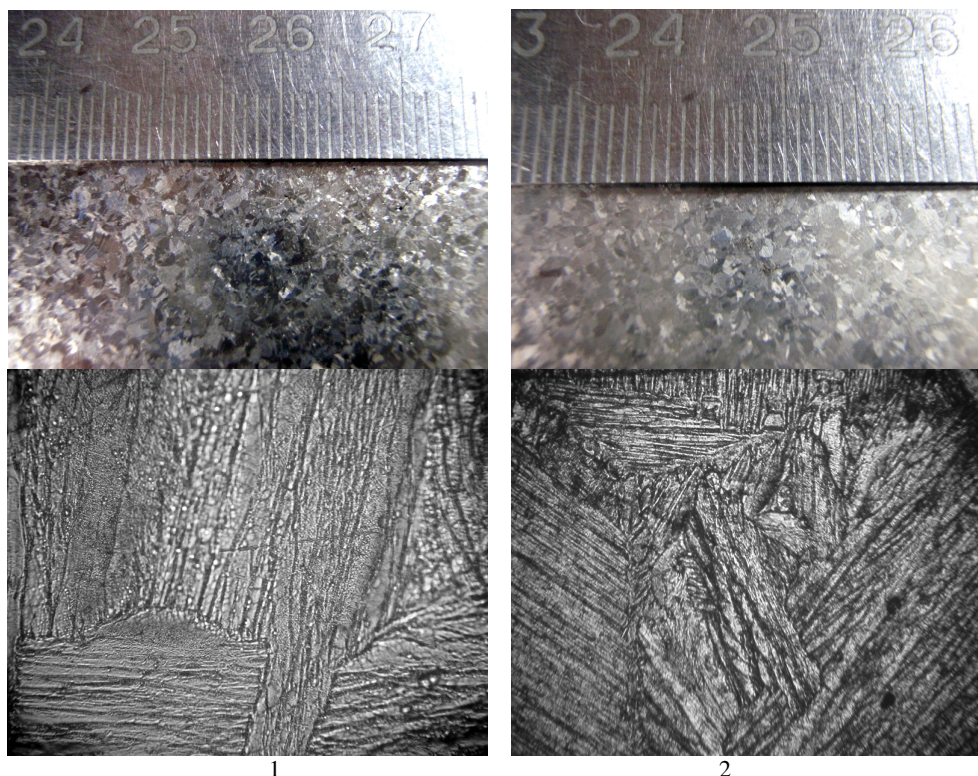


Рисунок 3 – Структуры опытных литых образцов сплава ВТ-5 (увеличение $\times 200$)

Выводы. Обоснована необходимость развития технологий литья готовых изделий и полуфабрикатов небольших масс из титана и его сплавов с использованием различных средств, способствующих получению качественного литья с высоким комплексом механических свойств.

Исследованы технологические факторы литейной технологии ЭЛГП с ЭМП расплава, способные влиять на структуру и свойства литого титана и сплавов на его основе.

Экспериментально установлено, что при помощи исследуемой технологии возможно получать готовые литые изделия и полуфабрикаты с заданными структурными параметрами и комплексом механических свойств.

На примере сплава ВТ-5, отлитого в ходе опытов, прослеживается тенденция к уменьшению возможности контроля структурных характеристик и механических свойств с увеличением степени легирования сплавов.

Дальнейшие разработки связаны с внедрением результатов исследований в литейное производство.

Библиографический список использованной литературы

1. Теслевич С.М. Основные направления в стратегии развития исследовательских работ по усовершенствованию технологии производства титановых полуфабрикатов и изделий на «ЗТМК» / С.М. Теслевич, Л.Я. Шварцман, Н.Н. Жигунов // Ti-2007 в СНГ: сб. тр. междунар. конф., Украина, г. Ялта, 15-18 апреля 2007 г. — Ялта, 2007. — С. 25–33.
2. Титан и области его применения / И.Ф. Червоный [и др.] // Ti-2007 в СНГ: сб. тр. междунар. конф., Украина, г. Ялта, 15-18 апреля 2007 г. — Ялта, 2007. — С. 314–325.
3. Петрунько А.Н. Состояние производства и перспективы развития титановой промышленности в Украине / А.Н. Петрунько, В.В. Тэлин, Н.П. Трегуб // Ti-2005 в СНГ: сб. тр. междунар. конф., Украина, г. Киев, 22-25 мая 2005 г. — Киев, 2005. — С. 13–19.
4. Полькин И.С. Перспективные направления науки о титане / И.С. Полькин // Ti-2008 в СНГ: сб. тр. междунар. конф., Россия, г. Санкт-Петербург, 18-21 мая 2008 года. — СПб, 2008. — С. 33–40.
5. Анташев В.Г. Современное состояние и тенденции развития исследований в области титановых сплавов. Все матер. / В.Г. Анташев, Н.А. Ночовная // Энцикл. справ. — 2008. — № 3. — С. 24–27.
6. Ermachenko A.G. Production of aircraft engine compressor rotor discs with desired service life in titanium alloys / A.G. Ermachenko, R.M. Kashaev // Material physics and mechanics. — 2011. — № 11 — P. 118–125.

7. Ефимов В.А.. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. — М.: Металлургия, 1995. — 272 с.
8. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / С.В. Ладохин [и др.]. — Киев: Изд-во «Сталь», 2007. — 626 с.
9. Физическое металловедение / Под ред. Кана. — М.: Мир, 1968. — Вып. 2. — 475 с.
10. Физическое металловедение / Под ред. Кана. — М.: Мир, 1968. — Вып. 3. — 471 с.
11. Механічні властивості литих титанових сплавів електронно-променевого переплаву / М.І. Левицький, Т.В. Лапшук, В.І. Мірошніченко, В.Т. Яковлев //Металознавство та обробка металів. — 2003. — № 3. — С. 69–73.
12. Стоев П.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости / П.И. Стоев, В.И. Мощенко // Вестник ХНУ им. Каразина. — 2003. — Т. 601. — Вып. 2. — С. 106–112.
13. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов / Е.Н. Львовский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1988. — 239 с.

Поступила в редакцию 21.05.2013 г.

Ворон М.М. Оцінка технологічних факторів електронно-променевої плавки, які впливають на структуру та властивості литих титанових сплавів

В роботі розглянуті можливості управління структурою і властивостями титану та сплавів на його основі, отриманих ливарним методом електронно-променевої гарнісажної плавки з електромагнітним перемішуванням розплаву. На прикладі технічно чистого титану проаналізовано вплив технологічних параметрів плавки на структуру і властивості литого матеріалу. На прикладі сплаву ВТ-5 розглянуті можливості управління властивостями литих титанових сплавів.

Ключові слова: титан та його сплави, електронно-променева ливарна технологія, управління структурою і властивостями.

Voron M. The estimation of EB-melting technological factors, that affect on structure and properties of cast titanium alloys

In this work the abilities of controlling structure and properties of titanium and its alloys obtained by electron-beam melting with electromagnetic stirring were considered. The technological factors influence on structure and properties of cast metal is analyzed on the example of pure titanium. The possibility of cast titanium alloys structure control is reviewed in the example with Ti-5Al alloy.

Keywords: titanium and its alloys, electron-beam casting technology, structure and properties forming control.