

УДК 62-405.8

Селективное электронно-лучевое плавление титанового сплава ВТ6

*Симич-Лафицкий Н.Д., студент
кафедра «Материаловедение в машиностроении»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана*

*Цветкова Е.В., аспирант
кафедра «Материаловедение в машиностроении»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана*

*Научный руководитель: Базалева К.О., к.ф.-м.н., доцент,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана
bauman@bmstu.ru*

Введение

В настоящее время большой интерес представляют технологии лазерной перекристаллизации порошковых материалов. Эти технологии дают возможность создавать детали сложной формы за счет 3d-компактирования, а также формировать изделия с градиентом пористости, изменяя технологические параметры процесса. Данные методы позволяют создавать детали достаточно больших размеров за короткое время, а высокие скорости охлаждения приводят к образованию структур, обладающих хорошими прочностными свойствами. В данной работе было проведено исследование структуры и свойств титанового сплава ВТ6 после электронно-лучевой перекристаллизации.

Материалы и методики

В данной работе электронно-лучевой перекристаллизации подвергался порошок титанового сплава ВТ-6, химический состав которого представлен в таблице 1. Размер частиц в исходном порошке составлял от 45 до 100 мкм. Нижний предел размера частиц (45 мкм) обеспечивает нормальный режим работы установки: частицы меньшего размера разлетаются по камере, попадая на катод.

Таблица 1

Химический состав сплава

Концентрация элементов, масс. %		
Al	Ti	V
4.4±0,1	90.3±0,1	5.3±0,1

В ЭЛП методе источником электронов является термоэмиссионный вольфрамовый катод. Электроны ускоряются разностью потенциалов 60 кВ и фокусируются на поверхности порошка в пятно, диаметр которого в зависимости от мощности электронного пучка варьируется от 0,2 до 1 мм, а мощность электронного пучка в свою очередь зависит от тока катода. При воздействии электронного пучка на порошковый материал он полностью переплавляется и при остывании заново кристаллизуется. Перемещение электронного пучка по поверхности порошкового материала осуществляется с помощью системы электромагнитных линз в соответствии с программой, что позволяет сформировать профиль любой формы. Первый слой объекта формируется на подложке из нержавеющей стали, которая расфокусированным электронным лучом разогревается до 760 °С. Перед нанесением каждого следующего слоя порошка предыдущий также разогревается пучком электронов.

В данной работе для проведения процесса ЭЛП использовалась установка ARCAM A2. Схема установки приведена на рисунке 1. При формировании объекта скорость сканирования электронного пучка по поверхности порошка составляла 8 000 м/с. Данный метод позволяет задать размер объекта с точностью до 0.2 мм, поверхность имеет среднюю шероховатость порядка 35 мкм.

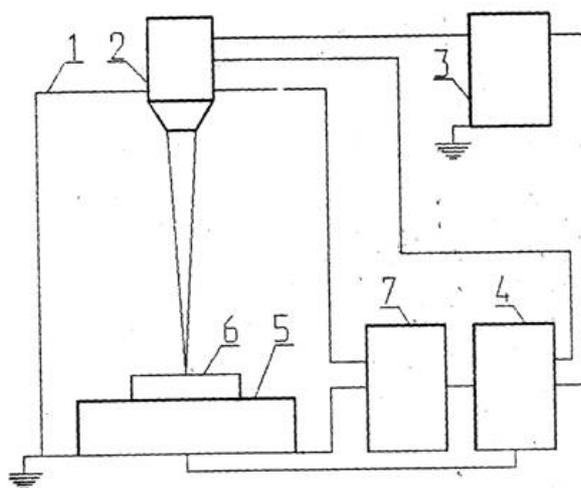


Рис. 1. Схема метода электронно-лучевого плавления: 1 - вакуумная камера; 2 - электронная пушка; 3 - высоковольтный выпрямитель; 4 - пульт управления; 5 - механизм перемещения обрабатываемого изделия; 6 - обрабатываемое изделие

Структура титанового сплава, полученная ЭЛП методом, исследовалась с помощью металлографического анализа, растровой электронной микроскопии. Методом рентгеноструктурного анализа определялся фазовый состав сплава, параметр решетки α - и

β -Ti и физическое уширение рентгеновских линий. Механические характеристики сплава определялись при испытании на растяжение и при измерении значения микротвердости. Электрохимическое поведение сплава оценивалось по току коррозии.

Результаты и их обсуждение

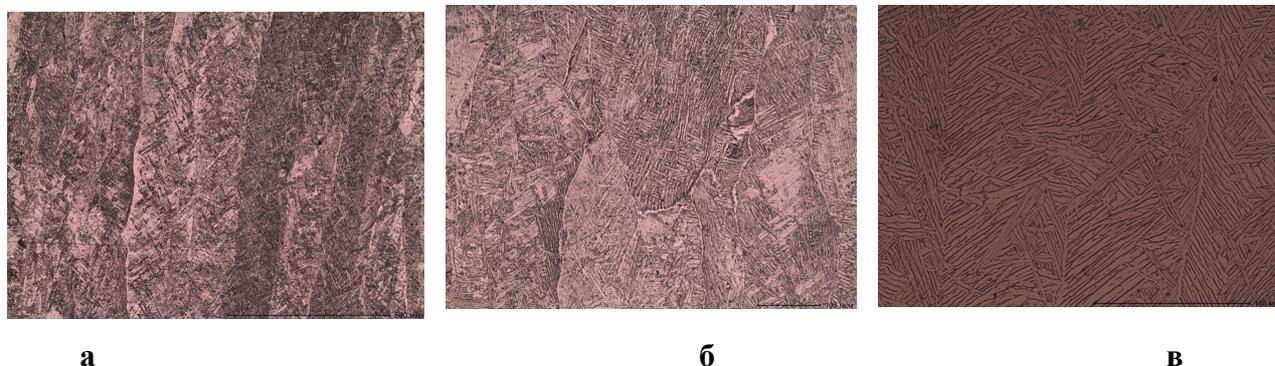


Рис.2. Структура сплава ВТ6, полученная методом ЭЛП при увеличении 100 (а), 200 (б) и 500 (в), соответственно

На рисунке 2 представлена металлографическая структура сплава ВТ6, полученного методом электронно-лучевого плавления. Из фотографии, полученной при увеличении 100, хорошо виден столбчатый характер формируемой структуры: ориентировка структуры совпадает с направлением теплоотвода при процессе формирования объекта. Наблюдаемая структура напоминает классическую видманштеттовую структуру, характерную для титановых $\alpha+\beta$ -сплавов. По границам первичного β -зерна выделяется светлая каемка α -фазы, а далее β -фаза распадается на переплетенные в виде корзинки α и β кристаллы равновесного состава.

Методом рентгеноструктурного анализа был исследован образец, полученный методом СЭЛП, в двух сечениях – продольном и поперечном. Было подтверждено наличие α и β фазы в структуре сплава. Также рассчитаны параметры решетки (гексогональная плотноупакованная) α -фазы $a=2.9225$ А, $c=4.6712$ А, тетрагональность c/a для α -фазы равна 1,6. Для β -фазы параметр решетки (ОЦК) $a=3,2101$ А. По результатам количественного фазового анализа процентное содержание β -фазы равно 8%, а α -фазы – 92%.

На рисунке 3 приведена деформационная кривая для сплава ВТ6, полученного методом ЭЛП, а в таблице 2 приведены механические характеристики сплава, полученные при обработке деформационной кривой. В таблице 3 приведены соответствующие характеристики для сплава ВТ6, подвергнутого стандартным обработкам: отжигу и

закалке со старением [1]. Из таблиц видно, что уровень свойств, который демонстрирует сплав после ЭЛМ, сопоставим с уровнем свойств отожженного сплава.

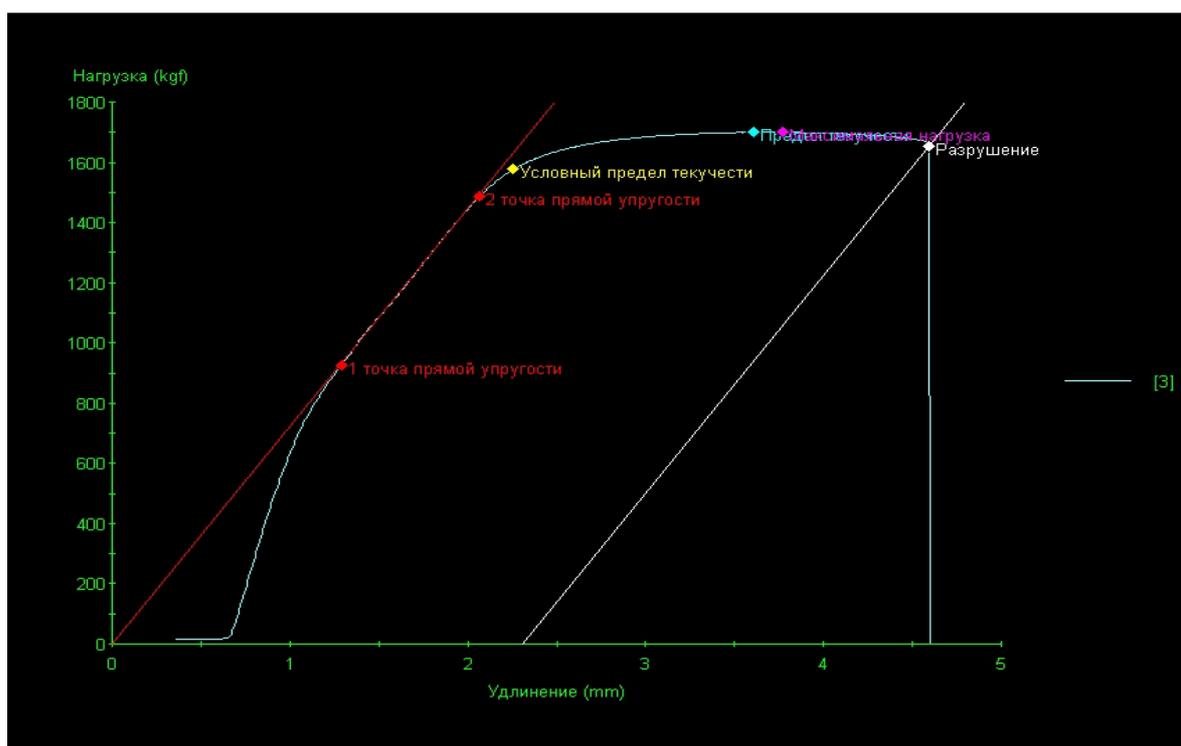


Рис. 3. Кривая растяжения сплава ВТ6, полученного методом ЭЛП

Кроме того, были произведены измерения микротвердости исследуемого сплава на поверхности и в сердцевине. Оказалось, что значение микротвердости одинаково на поверхности и в сердцевине сплава и составляет примерно 360 HV_{0.025}. Из таблице 4 видно, что это значение микротвердости соответствует верхнему пределу значений для сплава в закаленном и состаренном состоянии.

Таблица 2

Механические характеристики сплава ВТ6, полученного методом СЭЛП

Образец №	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	КСУ, кДж/м ²
1	803	733	10,1	5,6	29,8
2	750	694	7,5	7,0	29,9
3	780	723	8,8	6,9	34,6

Механические свойства материала ВТ6, при T=20°C

Сортамент	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	КСУ, кДж/м ²	Термообработка	Твердость, НВ
Пруток, ГОСТ 26492-85	835-885	6-8	15-20	250	Отжиг	255-341
Пруток, ГОСТ 26492-85	1080	4	12	200	Закалка и старение	293-361

Также были проведены испытания на коррозионную стойкость сплава после ЭЛП: определялся ток коррозии. По результатам испытаний было определено, что титановый сплав ВТ6, полученный методом СЭЛП не корродирует в 5% растворе NaCl. На рисунке 4 приведены кривые общей коррозии для эталонного образца, полученного методом горячей прокатки с последующим отжигом в вакууме, и образца, полученного методом СЭЛП.

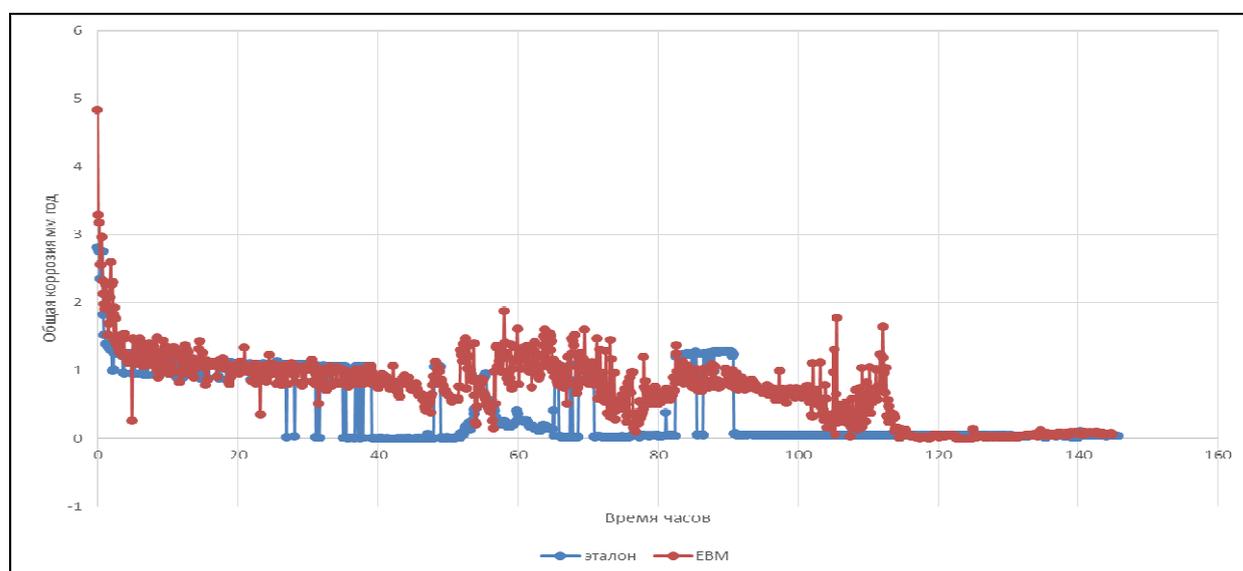


Рис. 4. Кривая общей коррозии по времени

Так же были проведены испытания на питтинговую коррозию. На рисунке 5 приведены кривые питтинговой коррозии по времени для эталона и образца, полученного методом СЭЛП.

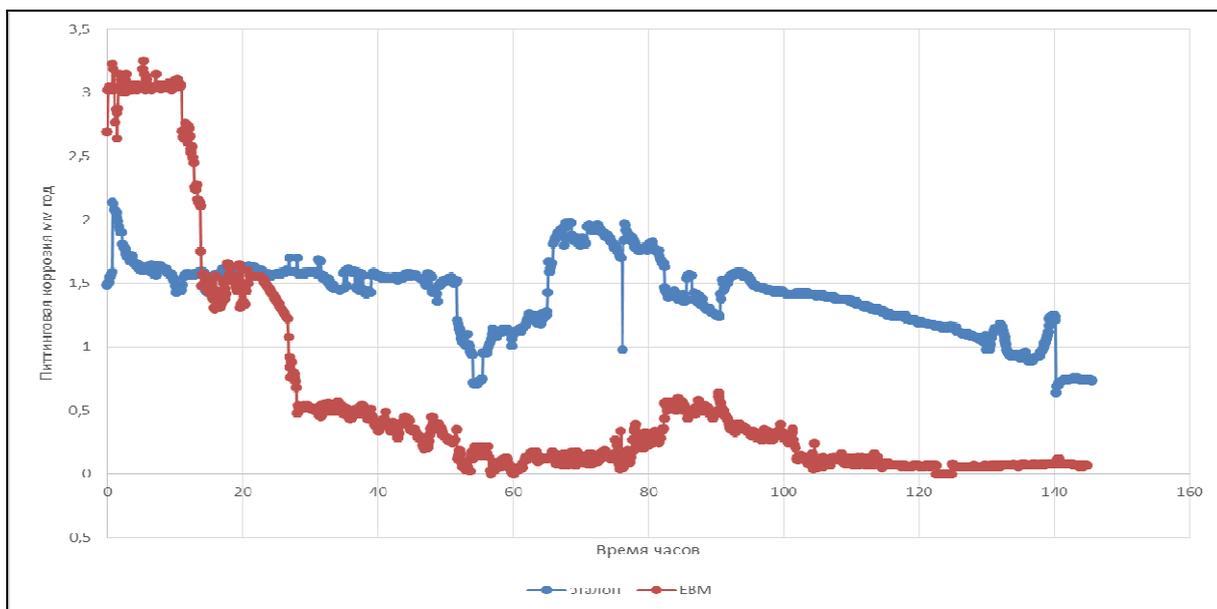


Рис.5. Скорость питтинговой коррозии для эталона и образца, полученного методом СЭЛП

Из графиков общей и питтинговой коррозии для эталона и исследуемого образца видно, что сплав полученный методом СЭЛП обладает большей стойкостью к питтинговой коррозии, а сопротивление общей коррозии практически одинаково с эталоном.

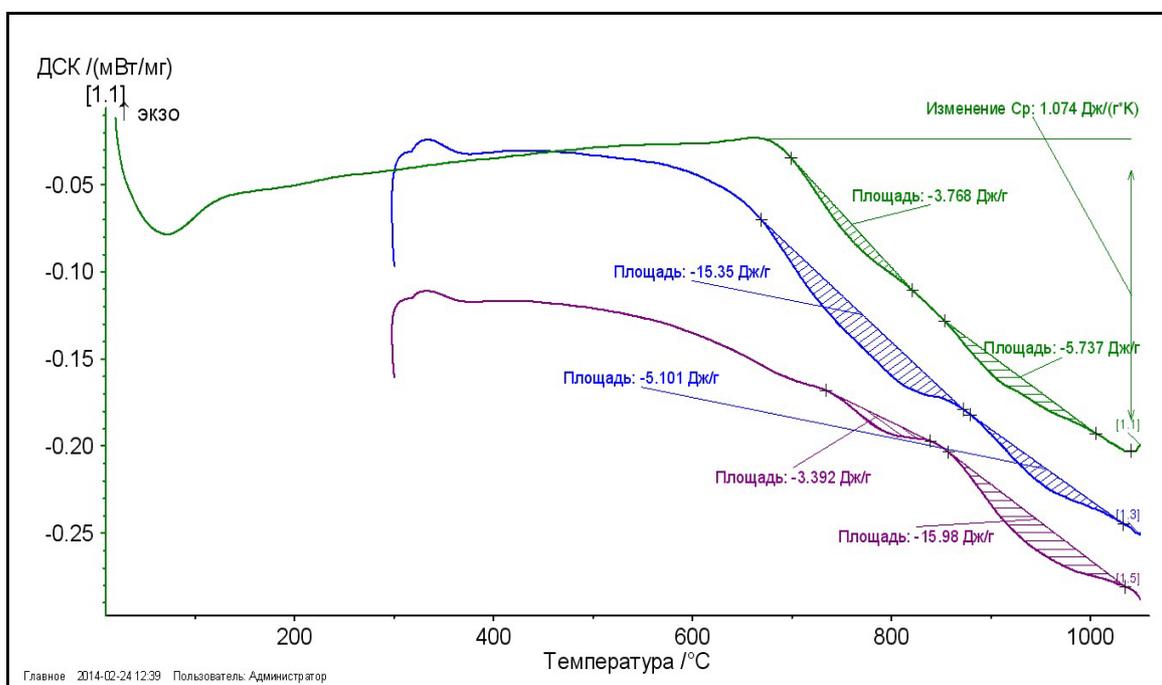


Рис. 6. Кривые ДСК образца из титанового сплава ВТ6, полученного методом СЭЛП, участок нагрева до температуры 1050°C

Для сравнения фазово-структурных превращений в сплаве после СЭЛП и эталонном образце был проведен термоанализ методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Эталонный образец изготовлен методом горячей прокатки и впоследствии отожжен при температуре 950°C в течение 2 часов. На рисунке 6 приведены кривые ДСК для исследуемого образца при нагреве до температуры 1050°C. Нагрев образца проводился трижды. На рисунке 6 зеленым цветом показан первый нагрев, синим и фиолетовым цветом второй и третий нагрев, соответственно. Мы видим, что на всех трех участках есть две отдельных эндотермических реакции, которые могут соответствовать полиморфному превращению α -фазы в β -фазу. Предположительно, полиморфное $\alpha \rightarrow \beta$ -превращение может быть разделено на два интервала, потому что превращение α -кристаллов, расположенных по границам β -зерен и внутри их зерен протекает при разных температурах. На рисунке показано изменение теплоемкости образца в интервале от 600°C до 1000°C при первом нагреве. Однако на кривых охлаждения мы не можем точно зафиксировать превращение (см. рис.7).

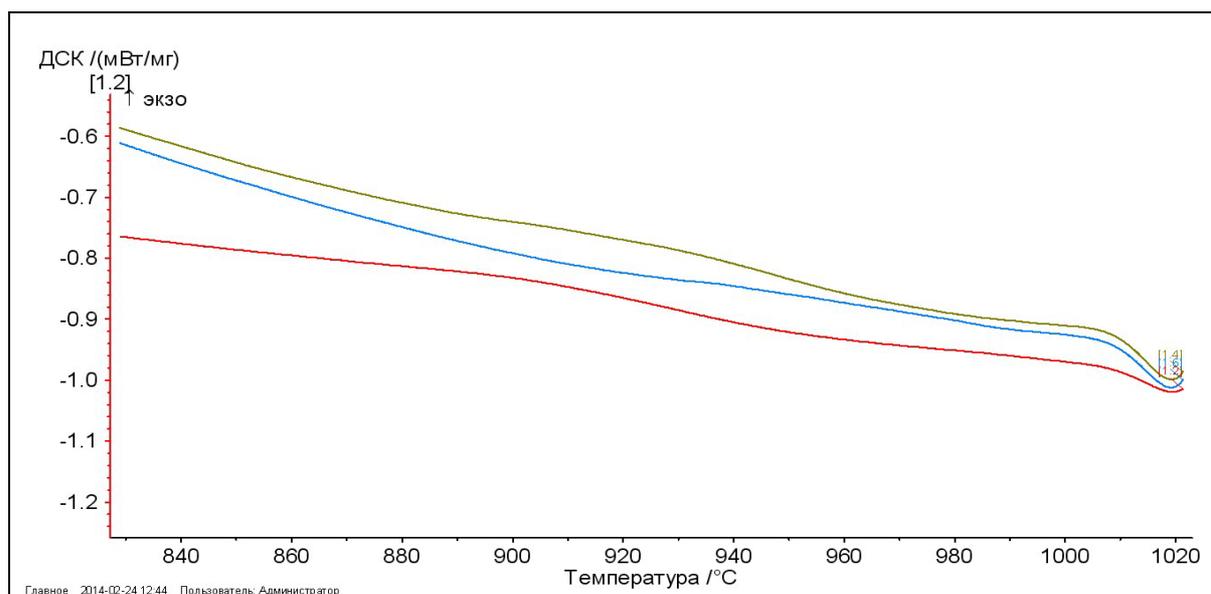


Рис. 7. Кривые ДСК образца из титанового сплава ВТ6, полученного методом СЭЛП, три участка охлаждения

На рисунке 8 мы видим активное выделение тепла в интервале температур 500°C - 900°C. Исходя из того, что образец был полностью отожжен и не имеет остаточных напряжений и принимая во внимание тот факт, что при втором и третьем нагреве отсутствуют экзотермические эффекты, мы предполагаем, что данное выделение энергии

связано с реакцией окисления поверхности. При втором нагреве окисление не идет дальше, из-за образовавшейся на поверхности оксидной пленки.

Сравнивая кривые ДСК (участки нагрева) эталонного образца и образца, полученного методом СЭЛП, мы можем сделать вывод о том, что исследуемый образец обладает большей жаростойкостью по сравнению с эталоном. Кроме того, следует отметить, что после термических испытаний эталонный образец был покрыт черной пленкой, тогда как образец, полученный методом СЭЛП, имел темно синий оттенок.

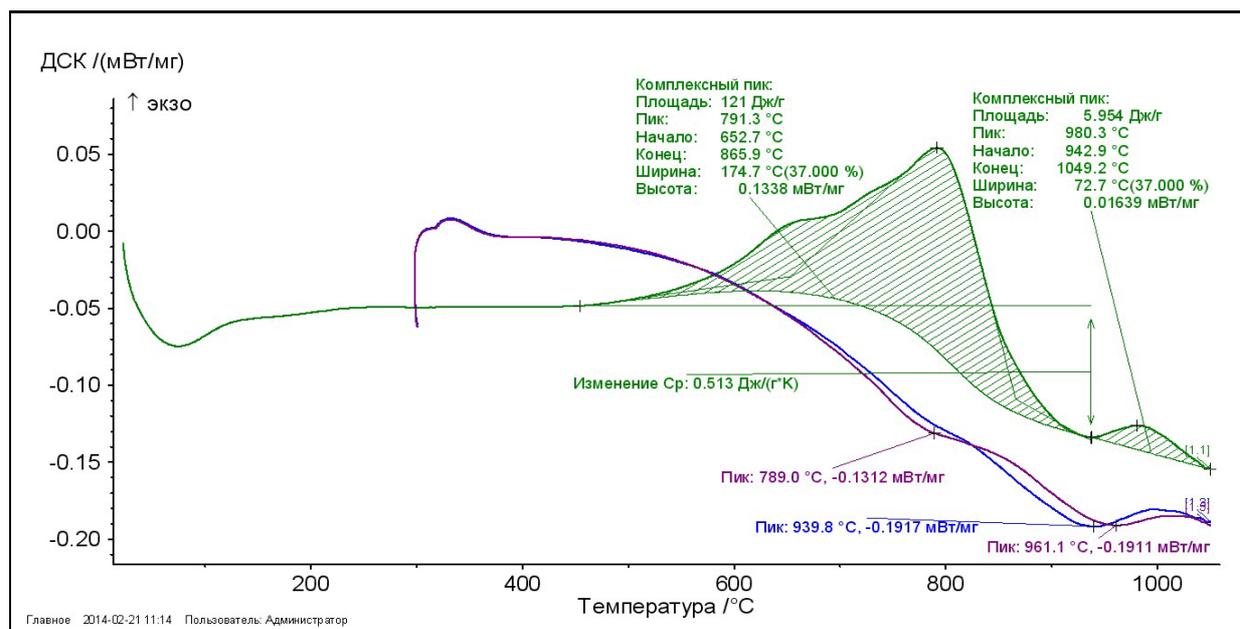


Рис. 8 Кривые ДСК эталона, 3-и участка нагрева до 1050°C

Заключение

Исследованы структура и свойства титанового сплава ВТ6 после электронно-лучевого плавления. Показано, что в структуре сплава присутствуют две фазы: α и β . Установлено, что сплав обладает высокой твердостью ($360 \text{ HV}_{0.025}$), а предел прочности и относительное удлинение близки к значениям, характерным для сплава в отожженном состоянии. Скорость общей коррозии в исследуемом сплаве составляет $0,007 \text{ мкм/год}$. Так же скорость питтинговой коррозии меньше у образцов, полученных методом СЭЛП. Сплав термо-динамически стабилен до температур $500 \text{ °C} - 550 \text{ °C}$ и имеет два эндотермических превращения при высоких температурах соответствующие фазовому переходу α -фазы в β -фазу.

Список литературы

1. Ильин А.А., Колачёв Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС - МАТИ, 2009. 520 с.
2. Вульф Б.К. Термическая обработка титановых сплавов, М.: металлургия, 1969. 376 с.
3. Аношкин Н.Ф. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М.: металлургия, 1980. 464 с.
4. Пер. с англ. С.Г. Глазунова Порошковая металлургия титановых сплавов, М.: металлургия, 1985. 263 с.