



УДК 669.187.526

ПРОИЗВОДСТВО ДИСКОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6, ПОЛУЧЕННОГО СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

**С. В. Ахонин, В. А. Березос, В. А. Крыжановский,
В. Д. Корнийчук, А. Н. Пикулин, А. Ю. Северин**

Показаны возможности получения высококачественных слитков титанового сплава VT6 способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Исследовано качество поковок, изготовленной из слитка титанового сплава VT6 способом электронно-лучевой плавки.

Capabilities are shown for producing high-quality ingots of titanium alloy VT6 using the method of electron beam cold hearth melting at the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. The quality of forging made of titanium alloy VT6 ingot by the method of electron beam melting was investigated.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; титановый сплав VT6; слиток; электронно-лучевое оплавление; поковка

Для энергетического машиностроения актуальна проблема повышения эксплуатационной надежности и ресурса деталей ответственных узлов, которые продолжительное время работали в условиях циклических нагрузок и повышенных температур. К таким деталям относятся роторы и диски турбины. На практике данная проблема решается путем создания современных конструкций, применения материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками, а также в результате внедрения в производство прогрессивных способов получения высококачественных заготовок.

Титановые сплавы с высокими значениями механических свойств нашли широкое применение при изготовлении ответственных деталей газотурбинных установок, которые в процессе работы испытывают воздействие больших статических и переменных напряжений при сравнительно высокой температуре.

Важным критерием при принятии решения об использовании титана вместо альтернативных конструкционных материалов является соотношение

цена/качество. Поэтому снижение себестоимости титановых слитков (исходного звена для производства полуфабрикатов) одновременно с повышением их качества является актуальной задачей.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) — прогрессивное направление металлургического производства титановых сплавов, позволяющая более глубоко очищать эти материалы от водорода, летучих металлических примесей и неметаллических включений.

ЭЛП позволяет снижать себестоимость титановых изделий за счет использования дешевых исходных шихтовых материалов в виде титановой губки более низких марок [1]. Поскольку производство слитков титана и его сплавов массой до нескольких десятков тонн способом ЭЛП перестало быть сложной проблемой, это также способствует снижению стоимости [2].

С целью оптимизации процесса плавки и получения слитков с гарантированным химическим составом, а также минимизации потерь легирующих элементов при ЭЛП в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведены комплексные исследовательские работы по получению слитков титана и его сплавов способом ЭЛП [2].



Рис. 1. Слиток титанового сплава ВТ6 диаметром 600 мм

По технологии ЭЛП с промежуточной емкостью и порционной подачей металла в водоохлаждаемый кристаллизатор получены слитки из титанового сплава ВТ6 диаметром 600 мм (рис. 1).

способность которого при ЭЛП практически неограничена из-за большой теплоемкости охлаждающей воды (4,2 кДж/кг·К), а ее температура при самом напряженном режиме плавки не превышает 65 °С. Поэтому для создания более равномерного теплоотвода вдоль внешнего радиуса слитка и увеличения скорости охлаждения при кристаллизации слитка максимум электронно-лучевого нагрева смещался в периферийную часть слитка.

Исследование химического состава полученных слитков показало (табл. 1), что состав слитков по всему сечению соответствует марочному составу титанового сплава ВТ6, распределение легирующих элементов как по длине, так и по поперечному сечению слитков равномерное. Как видно из табл. 1, содержание всех примесных элементов находится

Таблица 1. Распределение легирующих элементов и примесей по длине в слитке диаметром 600 мм из титанового сплава ВТ6, полученного способом ЭЛП

Место отбора проб	Средние значения концентрации элементов, %					
	Al	V	Fe	O	H	N
Верх	5,87	3,82	0,13	0,08	0,0007	0,011
Середина	5,90	3,80	0,16	0,07	0,0007	0,009
Низ	5,83	3,81	0,16	0,07	0,0007	0,011
ГОСТ 19807–91	5,3...6,8	3,5...5,3	<0,30	<0,15	<0,015	<0,04

На условия кристаллизации титановых сплавов при ЭЛП с промежуточной емкостью влияет не только общая мощность электронно-лучевого нагрева верхнего торца слитка в кристаллизаторе, но и ее распределение по поверхности слитка. Условия локального теплоотвода из зоны верхнего торца слитка, куда вкладывается тепло от жидкого перегретого металла, поступающего из промежуточной емкости, а также от электронно-лучевого нагрева, различны. Вблизи стенок кристаллизатора происходит интенсивный отвод тепла в водоохлаждаемую медную стенку кристаллизатора, являющегося мощным «холодильником», теплоотводящая спо-

в пределах требований ГОСТ 19807–91, причем концентрация водорода в титане не превышает 0,001 %, что в 15 раз меньше максимально допустимого стандартами значения. Повышенного содержания газов как в донной, так и в головной частях слитков не обнаружено.

Применение периферийного электронно-лучевого нагрева слитка в кристаллизаторе позволяет снизить тепловую нагрузку на центральную его часть, поддерживать при этом жидкую ванну вблизи стенок кристаллизатора, отвечающую за состояние боковой поверхности слитка. Тепловложение в центральную часть состоит практически только из теплосодержания жидкого металла, заливаемого из промежуточной емкости, и его скрытой теплоты кристаллизации. Скорость охлаждения при кристаллизации значительно возрастает, происходит объемная кристаллизация, изменяется структура слитка.

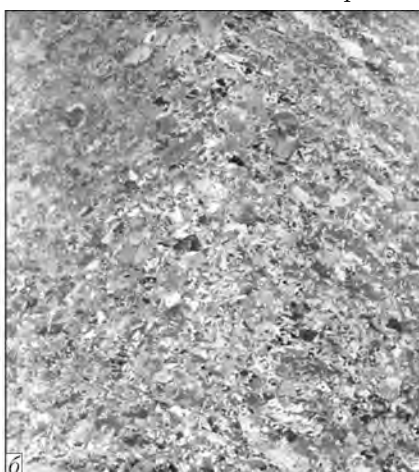
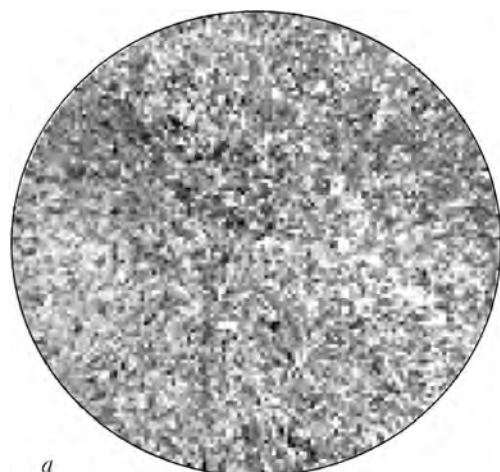


Рис. 2. Макроструктура слитка титанового сплава ВТ6 в поперечном (а) и продольном (б) сечениях

ния жидкого металла, заливаемого из промежуточной емкости, и его скрытой теплоты кристаллизации. Скорость охлаждения при кристаллизации значительно возрастает, происходит объемная кристаллизация, изменяется структура слитка.

Структура продольного сечения слитка, выплавленного с применением периферийного обогрева, характеризуется наличием равноосных зерен (рис. 2).

Структура металла слитков титанового сплава ВТ6



Рис. 3. Микроструктура (X100) слитка титана марки ВТ6

плотная, однородная, с отсутствием различно травящихся зон по сечению слитка. Существенной разницы в структуре центральной зоны слитка и периферийной зоны не обнаружено. Дефекты в виде пор, раковин, трещин и неметаллических включений не зафиксированы. Характерной для слитков ВДП сегрегации легирующих элементов не обнаружено.

Кристаллическое строение металла одинаковое по всей длине слитков и характеризуется кристаллами, близкими по форме к равноосным. Участки столбчатой структуры отсутствуют.

Типичная микроструктура сплава ВТ6 (рис. 3) характеризуется равноосными α-зернами размером 4...5 мкм, которые окаймлены по границам тонкой оторочкой α-фазы. Внутри зерна строение металла характеризуется тонкими α-пластинками толщиной около 2 мкм, собранными в колонии размером 200...300 мкм.

Важнейшим критерием качества титановых слитков является отсутствие в металле неметаллических включений, особенно в виде азотсодержащих альфированных частиц или нитридов титана. При переплаве титана по технологии ЭЛП с промежуточной емкостью создаются такие термические и физико-химические условия, которые обеспечивают удаление указанных включений.

Для определения в титановых слитках внутренних дефектов в виде неметаллических включений, пор и несплошностей использовали метод ультразвуковой дефектоскопии. При исследовании слитков

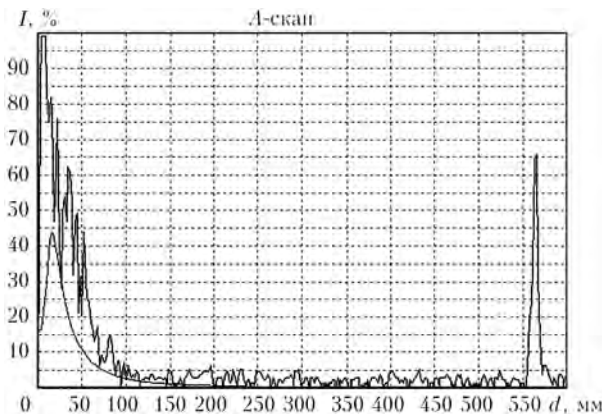


Рис. 4. Скан центральной части слитка диаметром 600 мм; I – интенсивность отраженного сигнала

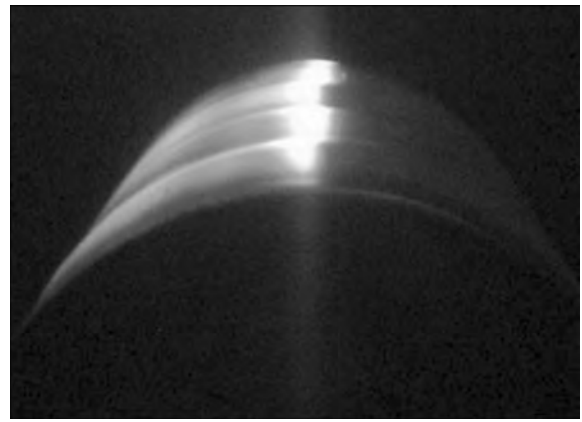


Рис. 5. Процесс оплавления слитка титана диаметром 600 мм

отмечены множественные отражения малой амплитуды. Это типично для литого металла и является результатом отражения сигнала от границ зерен. В ходе анализа не выявлены отражения, которые можно было бы интерпретировать как крупные неметаллические включения, поры, усадочные раковины. На скане четко определяется отражение донного импульса (рис. 4). В районе ввода зондирующих сигналов присутствуют шумы, обусловленные неплотным прилеганием датчика к поверхности слитка, которое не удается компенсировать путем применения «уплотняющей» смазки.

Таким образом, исследования показали, что в выплавленных способом ЭЛП слитках титановых сплавов отсутствуют несплошности, неметаллические включения размером более 1 мм, а также плотные скопления более мелких включений. Структура металла плотная, кристаллическая неоднородность и зональное строение слитка не выявлены.

С целью сокращения потерь металла в стружку вместо механической обработки применяют оплавление поверхности слитков электронным лучом, что позволяет увеличить выход годного металла на 10...15% [1, 3]. Этот способ применяли для оплавления внешней поверхности слитков диаметром 600 мм (рис. 5). Оплавление осуществляли на специализированной электронно-лучевой установке УЭ-185, оснащенной тремя электронно-лучевыми пушками для оплавления слитков [4], по режимам, рассчитанным с помощью математической модели теплофизичес-

Таблица 2. Содержание химических элементов в оплавленном слое слитка диаметром 600 мм титанового сплава ВТ6, полученного способом ЭЛП

Место отбора проб на слитке	Средние значения концентрации элементов в оплавленном слое, %					
	Al	V	Fe	O	H	N
Верх	5,77	3,88	0,13	0,09	0,0007	0,015
Середина	5,81	3,89	0,15	0,08	0,0008	0,015
Низ	5,69	3,86	0,15	0,09	0,0007	0,016
ГОСТ 19807-91	5,3...6,8	3,5...5,3	<0,30	<0,15	<0,015	<0,04

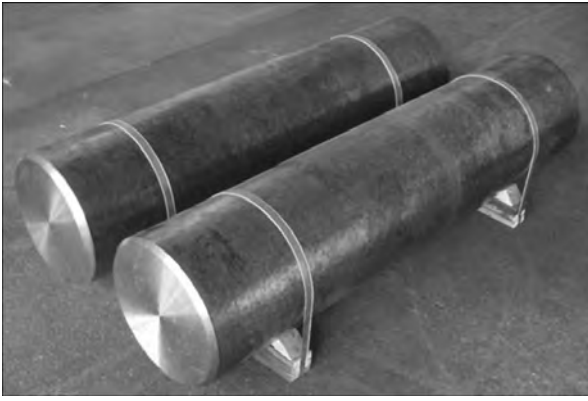


Рис. 6. Оплавленные слитки диаметром 600 мм титанового сплава ВТ6

ких процессов в слитке и процессов испарения легирующих элементов с поверхности ванны жидкого металла при электронно-лучевой обработке [5].

Так, слиток диаметром 600 мм подвергали электронно-лучевому оплавлению при удельной мощности нагрева $7,25 \text{ Вт/мм}^2$ и угловой скорости вращения от $0,0023$ до $0,0042 \text{ рад/с}$. Глубина проплавления поверхностного слоя при этом достигала 10 мм, что обеспечивало полное устранение поверхностных дефектов. При этом происходит изменение массовых концентраций легирующих элементов алюминия и ванадия в оплавленном слое, однако их содержание соответствует требованиям стандартов (табл. 2).

Макроструктура оплавленного слоя отличается отсутствием пор, несплошностей и зоны термических напряжений по границе оплавленного слоя и основы слитка, а микроструктура оплавленного слоя является характерной для литого металла с более тонким строением по сравнению с основной структурой слитка, что в свою очередь обуславливается более высокими скоростями кристаллизации оплавленного слоя. Шероховатость поверхности слитка после оплавления соответствовала классу 3...4 при волнистости поверхности, равной $0,2 \dots 0,6 \text{ мм}$ (рис. 6).

Проведены механические испытания образцов, взятых вдоль диаметра слитков в их поперечном сечении. Средние значения временного сопротивления σ_B , предела текучести $\sigma_{0,2}$, относительного удлинения δ и поперечного сужения ψ приведены в табл. 3.

Анализ результатов механических испытаний слитков титанового сплава ВТ6, полученного способом ЭЛП, показал повышенную технологическую пластичность в сравнении со слитками ВДП. Сле-



Рис. 7. Поковка диаметром 870x160 мм из титанового сплава ВТ6

дует отметить, что с точки зрения последующейковки и прокатки характеристики пластичности являются более важными для слитков, поскольку с их повышением уменьшается вероятность образования трещин при горячей деформации. Прочностные свойства не столь важны, так как рабочие характеристики металла формируются в процессе пластической деформации и последующей термообработки.

С целью изучения качества титановых слитков проведены комплексные исследовательские работы по изготовлению полуфабрикатов в виде поковок из слитков сплава титана ВТ6, полученных способом ЭЛП.

Структура и механические свойства поковок из титановых сплавов зависят от параметров деформации и могут изменяться в широких пределах. Вместе с тем особенностями полуфабрикатов, полученных с помощьюковки, являются более значительная неоднородность и нестабильность структуры и механических свойств, объясняющиеся широким диапазоном параметров деформации в пределах каждойковки. Поэтому стабильное обеспечение требуемого качества кованных полуфабрикатов, как правило, является более сложной задачей, чем требуемого качества полуфабрикатов, изготавливаемых другими способами пластической деформации.

Из слитков титанового сплава ВТ6, выплавленного способом ЭЛП с промежуточной емкостью, получена поковка диаметром $870 \times 160 \text{ мм}$ (рис. 7) для диска компрессора газотурбинной установки.

Для получения поковки из сплава титана ВТ6 использовали универсальный гидравлический пресс.

Таблица 3. Механические характеристики слитка из титанового сплава ВТ6 диаметром 600 мм

Способ плавки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	$KCV_{1,2}$ Дж/см
ЭЛП	885	841	8,2	27,2	39,0
ВДП	900	850	6,5	21,0	28,0

Таблица 4. Температурный интервал пластической деформации титанового сплава ВТ6

Температура превращения, °С	Температураковки, начала (не выше)/конца (не ниже), °С				
	слитка		деформированной заготовки		
950	1050	850	1000	850	

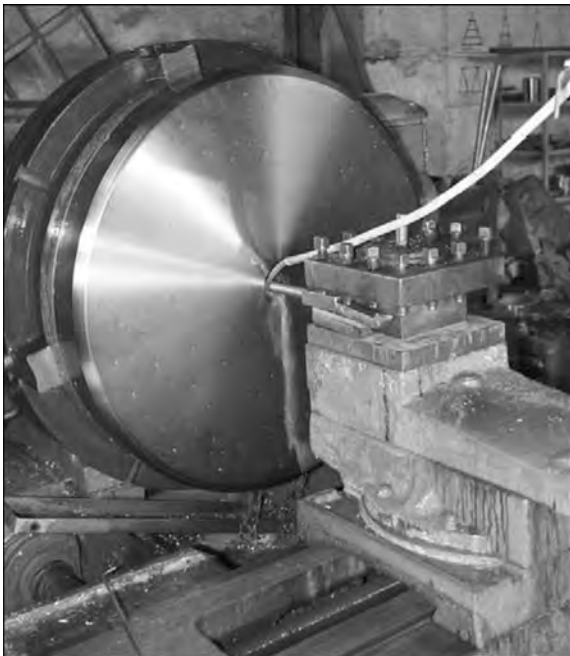


Рис. 8. Диск диаметром 870×150 мм из титанового сплава ВТ6

Ковку слитка выполняли под прессом усилием 25 МН. Во избежание резкого захлаживания поверхности деформируемого металла ковочный боек нагревали до значения температуры не ниже 250... 300 °С. Защитно-смазочные покрытия не применяли для исключения вырыва заготовки. Объем заготовки определяли по сумме объемов поковки и отходов. При этом объем отходов составлял до 10 % объема поковки.

Термомеханические режимы пластической деформации установлены исходя из технологических характеристик деформируемого сплава с учетом температуры фазового превращения, необходимых механических свойств и других требований (табл. 4).

На поверхности поковки из сплава ВТ6 при визуальном осмотре трещин, расслоений, включений, а также участков ликвационного происхождения не обнаружено (рис. 8).

Макроструктура поковки диаметром 870 мм титанового сплава ВТ6, определяемая на образцах, вырезанных в хордовом направлении, соответствует баллу 7 по 10-бальной шкале ВИАМ 1054–76 (рис. 9). Такой размер зерна согласуется с требованиями стандарта, согласно которому размер зерна не должен превышать 9 баллов.

В макроструктуре поковки отсутствуют трещины, расслоения, пустоты, пленки, металлические и неметаллические включения, видимые невооруженным глазом.



Рис. 9. Макроструктура поковки титанового сплава ВТ6

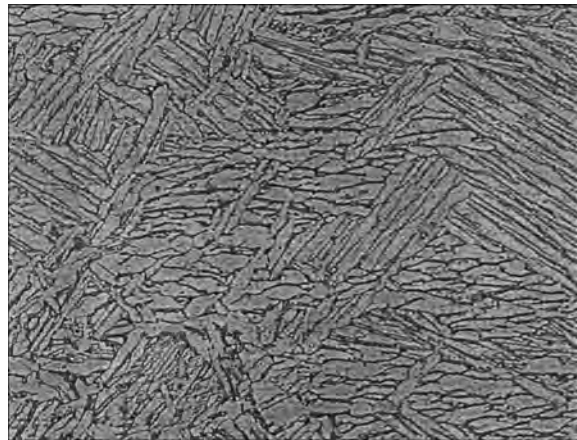


Рис. 10. Микроструктура (×500) поковки титанового сплава ВТ6

Микроструктура поковки соответствует типу 3...4 по 9-типной шкале микроструктур ОСТ1 90197–89 для сплава ВТ6 (рис. 10), что удовлетворяет требованиям стандартов.

Режимы термической обработки поковки из сплава ВТ6 выбраны ранее [6, 7]. Поковку подвергали термической обработке (двойному отжигу) по следующей схеме: нагрев при 950 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе, затем нагрев при 550 °С, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе.

В табл. 5 приведены механические свойства поковки диаметром 870×160 мм из титанового сплава ВТ6 после термической обработки.

Испытание на растяжение производили на образцах диаметром 5 мм с пятикратной расчетной длиной. Форма и размеры образцов, а также методика испытаний на растяжение соответствовали требованиям ГОСТ 1497–61. Скорость перемещения захватов при испытании на растяжение (при холостом ходе машины) составляла 15 мм/мин.

Форма и размеры образцов, а также методика определения ударной вязкости соответствовали требованиям ГОСТ 9454–60.

Контроль твердости производили на прессе Бригелля. Методика испытаний соответствовала требованиям ГОСТ 9012–59.

Как видно из табл. 5, крупногабаритная поковка диаметром 870×160 мм титанового сплава ВТ6 по механическим свойствам удовлетворяет требованиям стандарта.

Исследования показали, что свойства диска диаметром 870×160 мм из титанового сплава ВТ6, изготовленного из слитка, выплавленного по разработанной технологии ЭЛП, отвечают всем требова-

Таблица 5. Механические свойства поковки титанового сплава ВТ6

№ образца	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²	НВ
1	950	12	42	11,3	270
ОСТ 1.90197–89	950... 1150	≥10	≥30	≥4	269... 363



ниям, предъявляемым промышленностью к качеству титановых сплавов (табл. 3).

Таким образом, технологические процессы ЭЛП, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, позволяют получать высококачественные слитки титана и его сплавов с однородной бездефектной структурой, которые в дальнейшем могут быть использованы для нужд энергетического машиностроения.

1. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 250 с.
2. *Производство крупногабаритных слитков жаропрочных сплавов на основе титана способом ЭЛП* / Н. П. Тригуб, В. А. Березос, В. А. Крыжановский, А. Ю. Северин // Современ. электрометаллургия. — 2010. — № 3. — С. 11–14.

3. *Электронно-лучевая установка УЭ-185 для оплавления поверхностного слоя слитков* / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. Н. Пикулин и др. // Там же. — 2003. — № 3. — С. 12–14.
4. *Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В.* Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекрационных металлов. — Киев: Наук. думка, 2008. — 311 с.
5. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 268 с.
6. *Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. — М.: Металлургия, — 1981. — 416 с.
7. *Вульф Б. К.* Термическая обработка титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1969. — 375 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 12.11.2012

<http://www.vsm-po.ru>



ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и Boeing договорились о расширении совместного предприятия и сотрудничества в сфере НИОКР

Крупнейший в России производитель титана — корпорация ВСМПО-АВИСМА, входящая в Ростехнологии, и американская компания Boeing подписали меморандум о расширении сотрудничества в сфере поставок титана за счет увеличения мощностей совместного предприятия на Урале. Стороны также продолжают сотрудничество в сфере НИОКР, в частности, по разработке новых сплавов и технологий.

Сегодня стороны ведут совместную работу по созданию двух новых сплавов, которые могут быть использованы для нужд российской аэрокосмической индустрии. За последние годы Boeing и ВСМПО-АВИСМА разработали в совместном инновационном центре три новые технологии. Так, высокопрочный титановый сплав Ti5553, разработанный ВСМПО-АВИСМА, позволяет существенно снизить вес самолета, что обеспечивает экономию топлива. Это, в свою очередь, повышает рентабельность и безопасность авиаперевозок и оказывает положительное влияние на экологию. Титановый сплав Ti5553 применяется в деталях самолета Boeing-787 Dreamliner и может использоваться в последующих программах.

Корпорация «Ростехнологии» является важным и надежным партнером Boeing уже долгие годы. Вместе достигнуты результаты, позволяющие расти бизнесу обеих компаний и еще больше увеличить взаимовыгодное сотрудничество.

Также Boeing и ВСМПО-АВИСМА расширят совместное предприятие Ural Boeing Manufacturing (UBM), что обеспечит увеличение производительности механообработки тележек шасси самолетов Boeing 737. Совместное предприятие приобрело четыре новейших высокотехнологичных станка, установка которых запланирована на 2013 год. Они будут использоваться для поддержки роста объемов выпуска самого популярного в истории авиации коммерческого самолета Boeing 737.

«Сотрудничество с лидером мирового гражданского самолетостроения требует соблюдения технических характеристик, показателей качества и технико-экономических требований на уровне высших мировых стандартов, — отметил генеральный директор корпорации ВСМПО-АВИСМА Михаил Воеводин. — Благодаря НИОКР и применению самых современных технологий управления производством стоимость деталей из титана снижается, они становятся доступны для использования в гражданском авиастроении. В прошлом титан был доступен только для продукции оборонного назначения».

В 2012 году корпорация ВСМПО-АВИСМА произвела 29,5 тыс. т титана, 18 % которого было поставлено Boeing. На данный момент российское предприятие обеспечивает до 40 % потребностей американской компании в этом металле.