



УДК 621.791.72

ПРОИЗВОДСТВО КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT3-1, ПОЛУЧЕННОГО СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

**Н. П. Тригуб, В. А. Березос,
В. А. Крыжановский, В. Д. Корнийчук**

Показаны возможности получения высококачественных слитков жаропрочных титановых сплавов способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Исследовано качество полуфабриката в виде крупногабаритного диска, изготовленного из слитка жаропрочного титанового сплава VT3-1.

The possibilities are shown at the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine for producing high-quality ingots of high-temperature titanium alloys using the method of electron beam cold hearth melting. Quality of semi-product in the form of a large-sized disc, manufactured of high-temperature titanium alloy VT3-1 ingot, was investigated.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; слитки жаропрочных титановых сплавов; крупногабаритные диски; качество

В энергетическом машиностроении к современным газотурбинным установкам предъявляются высокие требования относительно уровня прочностных характеристик в широком диапазоне условий эксплуатации, общей массы и пр. Одним из основных средств повышения КПД стационарных турбоагрегатов является создание паровых и газовых турбин большой мощности. Однако для повышения мощности необходимо увеличение некоторых параметров турбин и в первую очередь прочности и габаритов основных деталей. Это касается роторов и дисков турбин. Для увеличения габаритов при одновременном повышении прочности материала заготовок этих деталей необходимо решить ряд металлургических задач по удовлетворению конструкторским требованиям, предъявляемых к материалу.

Производство дисков для газотурбинных установок по традиционным технологиям отличается значительной трудо- и металлоемкостью. Применение новых конструкционных материалов связано не только с физико-механическими свойствами, но и такими характеристиками, как технологичность,

дефицитность и стоимость. Таким образом, создание современных конкурентоспособных газотурбинных установок невозможно без совершенствования конструкционных материалов и технологии их производства.

По комплексу физико-механических свойств титановые сплавы являются универсальными конструкционными материалами. В настоящее время мировые тенденции развития технологий изготовления слитков жаропрочных титановых сплавов и производства из них полуфабрикатов для получения деталей являются практически общими для всех предприятий, что имеет решающее значение при обеспечении стабильности и необходимого уровня эксплуатационных свойств.

Одним из прогрессивных направлений металлургического производства жаропрочных титановых сплавов является электронно-лучевая плавка (ЭЛП), позволяющая не только глубоко очищать эти материалы от газовых и летучих металлических примесей, но и существенно упрощать процесс металлургического передела, обеспечивать получение изделий с качественно новыми физико-химическими и механическими свойствами.



Рис. 1. Процесс плавки слитка титанового сплава ВТЗ-1 диаметром 840 мм

Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) дает возможность снизить себестоимость титановых изделий за счет использования дешевых исходных шихтовых материалов в виде титановой губки [1], а также увеличения массы получаемых слитков до нескольких десятков тонн [2].

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведены комплексные исследовательские плавки слитков жаропрочных сплавов способом ЭЛП [3]. С целью оптимизации процесса плавки и получения слитков с гарантированным химическим составом, а также минимизации потерь легирующих элементов при ЭЛП крупногабаритных слитков жаропрочных сплавов титана выполнены математические расчеты технологических параметров нагрева поверхности слитка в кристаллизаторе [3], произведены эксперименты по получению слитков жаропрочных титановых сплавов ВТЗ-1 диаметрами 840 и 1100 мм.

С использованием рассчитанных режимов электронно-лучевого нагрева слитка в кристаллизаторе на электронно-лучевой установке УЭ 5812 [4] выполнены экспериментальные плавки по получению слитков из титанового сплава ВТЗ-1 (рис. 1).

Боковая поверхность выплавленного слитка после охлаждения в вакууме была чистой, повышенная концентрация примесных элементов на поверхности в виде окисленного или альфированного слоя отсутствовала. Глубина поверхностных дефектов типа гофр составляла не более 1...3 мм. Дефекты в виде разрывов, трещин или несплавлений не обнаружены.

С целью сокращения потерь металла вместо механической обработки применяли оплавление поверхности слитков электронным лучом, что позволяет увеличить выход годного металла на 10...15% [5, 6]. Этот способ использовали для оплавления внешней поверхности слитка диаметром 840 мм (рис. 2). Оплавление осуществляли на специализированной электронно-лучевой установке УЭ5810, оснащенной четырьмя электронно-лучевыми пушками [7].

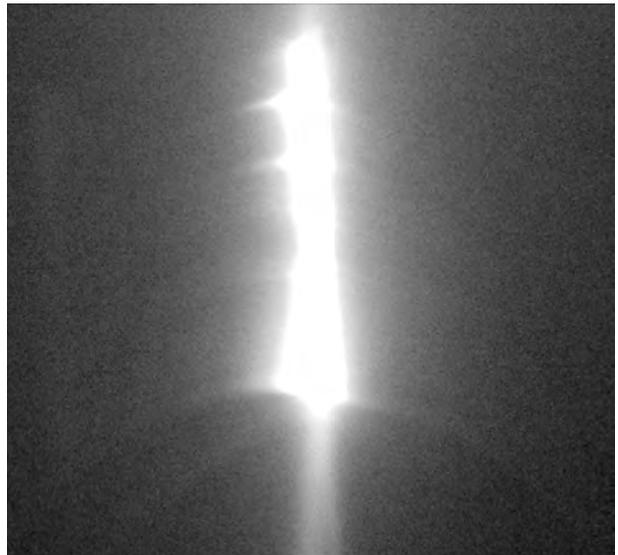


Рис. 2. Процесс оплавления слитка титана диаметром 840 мм

Шероховатость поверхности слитка после оплавления соответствовала 3–4 классу при волнистости поверхности 1...3 мм.

Полученный в печи ЭЛПЕ слиток из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1 (рис. 3) подвергали всесторонним исследованиям для оценки его свойств.

Исследование химического состава слитка показало (табл. 1), что он по всему сечению соответствует марочному составу титанового сплава ВТЗ-1, а распределение легирующих элементов как по длине, так и по поперечному сечению слитка равномерное, содержание примесных элементов отвечает требованиям ГОСТ 19807–91 (табл. 1), причем концентрация водорода в титане не превышает 0,001%, что в 15 раз меньше максимально допустимого стандартами значения. Повышенное содержание газов как в донной, так и в головной частях слитков не обнаружено.

Важнейшим критерием качества титановых слитков является отсутствие в металле неметаллических включений, особенно в виде азотсодержа-



Рис. 3. Внешний вид оплавленного слитка титанового сплава ВТЗ-1 диаметром 840 мм



Таблица 1. Распределение легирующих элементов и примесей по длине в слитка диаметром 840 мм из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1, полученного способом ЭЛПЕ

Часть слитка	Место отбора пробы*	Массовая доля элементов, %							
		Al	Mo	Cr	Fe	Si	H	O	N
Верхняя	О	6,25	2,28	1,72	0,29	0,32	0,001	0,09	0,011
	С	6,30	2,40	1,83	0,30	0,33			
	П	6,15	2,35	1,63	0,30	0,33			
Средняя	О	6,20	2,27	1,73	0,29	0,33	0,001	0,11	0,009
	С	6,27	2,38	1,70	0,29	0,35			
	П	6,18	2,36	0,70	0,30	0,30			
Нижняя	О	6,35	2,43	1,88	0,28	0,36	0,001	0,09	0,011
	С	6,26	2,50	1,95	0,28	0,35			
	П	6,14	2,44	1,90	0,26	0,30			
ГОСТ 19807-91		5,5...7,0	2,0...3,0	0,8...2,0	0,2...0,7	0,15...0,40	<0,015	<0,015	<0,05

*Здесь О обозначает зону вблизи оси слитка; С — вблизи середины радиуса; П — в периферийной части (10 мм от поверхности слитка).

щих альфированных частиц или нитридов титана. При переплаве титана по технологии ЭЛПЕ создаются термические и физико-химические условия, обеспечивающие удаление указанных включений.

Для определения в титановых слитках внутренних дефектов в виде неметаллических включений, пор и несплошностей использовали метод ультразвуковой дефектоскопии. Исследовали слитки путем последовательного ручного сканирования боковой поверхности по радиусу вдоль продольной оси слитков. Для обеспечения охвата всего объема полого слитка сканированию подвергали всю его боковую поверхность.

При контроле слитка диаметром 840 мм использовали преобразователь ультразвуковой П121-1.25-40-М-003 частотой 1,25 МГц, поскольку он обеспечивает меньший коэффициент затухания и лучшее соотношение сигнал/шум.

При исследовании слитка зафиксированы множественные отражения малой амплитуды, типичные для литого металла, что является следствием

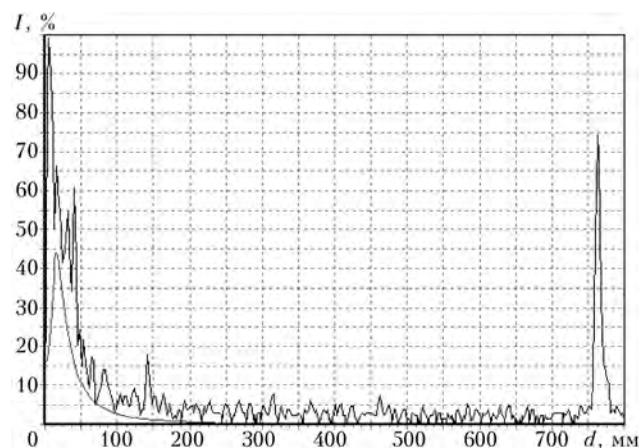


Рис. 4. Типичный УЗК скан средней части слитка диаметром 840 мм; I — интенсивность отраженного сигнала

отражения сигнала от границ зерен (рис. 4). В результате анализа не выявлены отражения, которые можно было бы интерпретировать, как крупные неметаллические включения, поры усадочные раковины. На скане четко определено отражение донного импульса. В районе ввода зондирующих сигналов присутствуют шумы, обусловленные неплотным прилеганием датчика к поверхности слитка, которое не удается компенсировать применением «уплотняющей» смазки.

Макроструктуру слитка изучали на поперечных темплетах, вырезанных на расстоянии 150 мм от верха и низа слитков, а также из их середины. Выявление структуры проводили травлением темплетов в 15%-м растворе фтористой кислоты с добавлением 3%-й азотной кислоты при комнатной температуре.

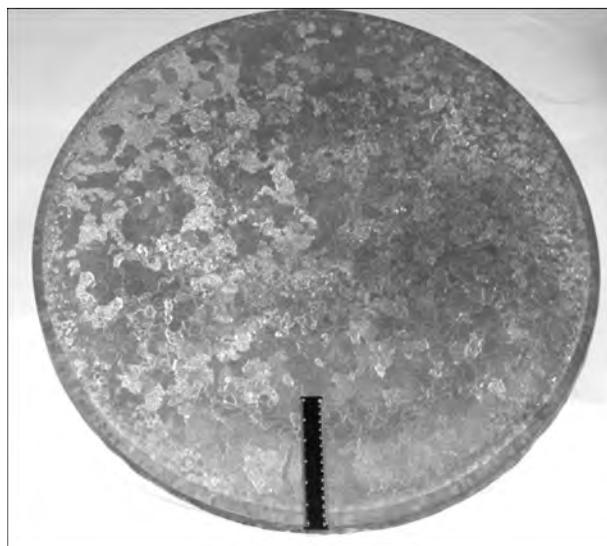


Рис. 5. Макроструктура слитка (поперечное сечение) диаметром 840 мм сплава ВТЗ-1, выплавленного при периферийном обогреве поверхности слитка в кристаллизаторе

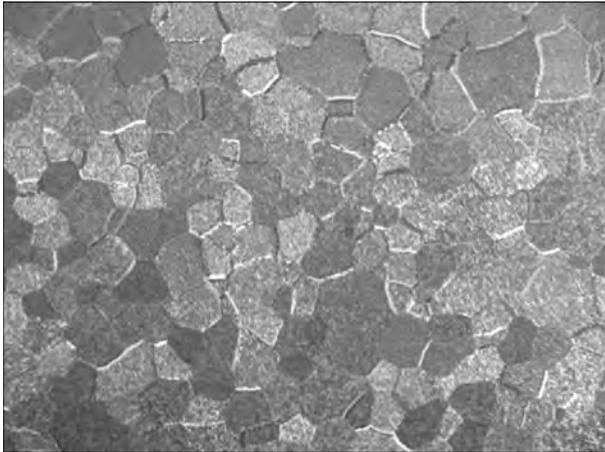


Рис. 6. Макроструктура слитка титанового сплава BT3-1

Макроструктура слитка диаметром 840 мм жаропрочного титанового сплава BT3-1 на поперечном темплете головной части слитка, выплавленного с применением периферийного обогрева, — плотная, однородная, с отсутствием различно травящихся зон по сечению слитка (рис. 5). Существенной разницы в структурах центральной зоны слитка и периферийной не обнаружено. Также отсутствует сегрегация легирующих элементов.

Макроструктура не имеет дефектов в виде пор, раковин, трещин, рыхлот, металлических и неметаллических включений и других дефектов, видимых невооруженным глазом. Размер зерна, определяемый по 10-балльной шкале макроструктур согласно «Инструкции № 1054-76 ВИАМ», соответствует баллу 9-10 (рис. 6).

Оплавленный слой по окружности слитка имеет глубину 15... 20 мм и образован мелкими кристаллами (рис. 7), вытянутыми в направлении кристаллизации, т. е. к центру слитка. Зона термического влияния, обусловленная температурным воздействием электронного луча, составляет 100... 120 мм и имеет повышенную травимость. Балл зерна у основного металла и металла ЗТВ одинаков.

Микроструктура слитка титанового сплава BT3-1 характеризуется пластинчатой ($\alpha+\beta$)-структурой, образующейся в результате фазовой перекристаллизации при охлаждении с температур β -области. Исходные β -зерна окаймлены по границам тонкой оторочкой α -фазы (рис. 8).

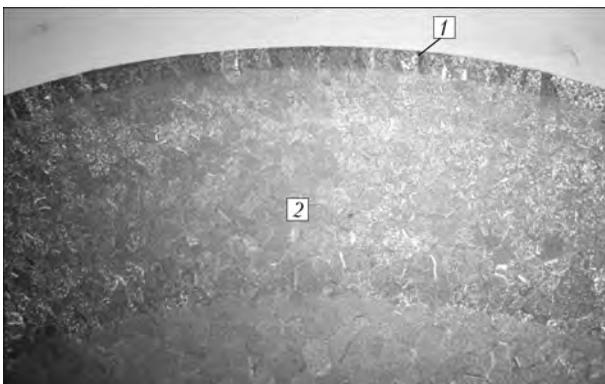


Рис. 7. Оплавленный слой (1) и зона термического влияния (2)



Рис. 8. Микроструктура титанового сплава BT3-1, X200

Микроструктура металла ЗТВ аналогична таковой основного металла, но имеет более тонкое внутриверетенное строение. Оплавленный слой характеризуется мелкими вытянутыми к центру зернами с корзинчатой мелкодисперсной структурой литого металла.

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

При производстве полуфабрикатов из титановых сплавов и соблюдении определенных предосторожностей горячую деформацию титановых слитков можно осуществлять на том же печном, кузнечно-прессовом и прокатном оборудовании, используемом для обработки стали [8].

Прочность жаропрочных титановых сплавов определяется не только степенью легирования, но и параметрами обработки давлением, последующей термической или термомеханической обработкой. Однако повышение прочности сплава, как правило, приводит к снижению его пластичности, что является существенным недостатком материала при изготовлении из него конструкций, работающих на вибрацию, повторную статику, изгиб, ударные нагрузки. Поэтому в последнее время все большее внимание уделяют совершенствованию ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов, оптимизации параметров деформиро-



Рис. 9. Поковка диаметром 1950×160 мм из жаропрочного титанового сплава BT3-1



Рис. 10. Диск диаметром 1900×150 мм из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1

вания слитков при изготовлении из них полуфабрикатов и режимов упрочняющей термической обработки.

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

Физико-химические и теплофизические особенности титана и сплавов на его основе требуют тщательного подхода к процессам их деформирования. Это обусловлено следующими факторами. Пониженная теплопроводность титановых сплавов приводит к температурным перепадам по сечению слитков и заготовок при их нагреве, возникновению значительных внутренних напряжений, а в отдельных случаях — к образованию трещин. Это обуславливает необходимость ограничения скорости нагрева, особенно слитков и заготовок больших размеров. При охлаждении заготовок также могут возникать значительные температурные перепады. Например, быстрое захлаживание острых углов, тонких элементов сечений заготовок чрезвычайно затрудняет обеспечение равномерной деформации, способствует образованию трещин и ряда других дефектов.

Не менее важное значение в технологическом процессековки титановых сплавов имеет степень деформации, выбор которой осуществляется во взаимосвязи с температурой.

Заметное измельчение структуры титановых сплавов начинается при значениях степени деформации, превышающих 30...40 %. Для полного измельчения крупнозернистой пластинчатой структуры и ее превращения в структуру глобулярного типа необходимо, чтобы деформация при температурах $\alpha+\beta$ -области составляла не менее 60...70 %. Особенно важными являются правильный выбор и ре-

ализация необходимой степени деформации на завершающих операцияхковки. Для обеспечения устойчиво высоких прочности и пластичности степень деформации при окончательнойковке должна составлять не менее 40...50 % при условии достаточно равномерного ее распределения по объему деформируемой заготовки. Таким образом, качество поковок из титановых сплавов в значительной мере зависит от исходных заготовок. Чем больше диаметр слитка и чем крупнее исходная структура, тем большая деформация должна быть обеспечена в процессе его переработки.

С целью изучения качества титановых слитков проведены комплексные исследования по изготовлению полуфабрикатов в виде поковок из слитков жаропрочных сплавов титана ВТЗ-1, полученных способом ЭЛП.

Впервые в мировой практике из слитка титанового сплава ВТЗ-1, выплавленного способом ЭЛПЕ, получена поковка диаметром 1950×160 мм (рис. 9) для крупногабаритного диска газотурбинной установки (рис. 10) Для этой цели использовали универсальный гидравлический пресс.

Поскольку по энергосиловым параметрам деформирования титановые сплавы наиболее близки к нержавеющей и жаропрочным сталям, то ковку слитка осуществляли под прессом усилием 25 МН. Во избежание резкого захлаживания поверхности деформируемого металла ковочный боек нагревали до температуры не ниже 250...300 °С. Защитно-смазочные покрытия не применяли с целью предотвращения 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 др.

Температурный интервал пластической деформации титанового сплава ВТЗ-1, °С

Сплав.....	ВТЗ-1
Температура превращения	970
Температураковки слитка начала (не выше)/конца (не ниже)	1050 / 850
Температураковки деформированной заготовки начала (не выше)/конца (не ниже)	1000 / 850

Таблица 2. Химический состав поковки титанового сплава ВТЗ-1, мас. %

Объект анализа	Al	Mo	Cr	Fe	Si
Поковка ВТЗ-1	6,26	2,29	1,74	0,30	0,33
ОСТ 90013-81	5,5...7,0	2,0...3,0	0,8...2,0	0,2...0,7	0,15...0,40

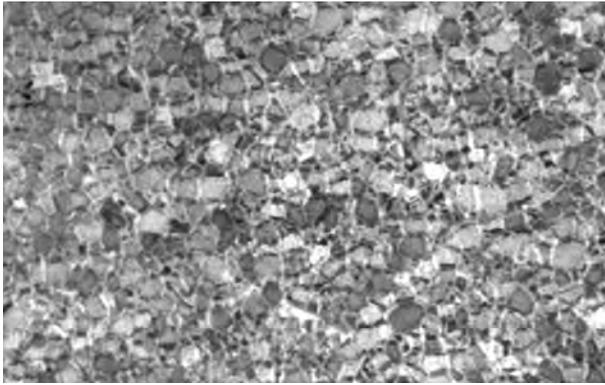


Рис. 11. Макроструктура поковки титанового сплава BTZ-1

На поверхности поковки из сплава BTZ-1 при визуальном осмотре трещин, расслоений, включений, а также участков ликвационного происхождения не обнаружено.

Химический состав определяли химическим анализом (табл. 2). Содержание элементов соответствует ГОСТ19807–91.

Макроструктуру поковки из слитка диаметром 840 мм титанового сплава BTZ-1 определяли на образцах, вырезанных в хордовом направлении. Она соответствует 5-6 баллу по 10-бальной шкале ВИ-АМ 1054–76 (рис. 10) в соответствии с требованиями стандарта.

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

Микроструктура поковки соответствует 5-6 типу 9-типной шкалы микроструктур ОСТ1 90197–89 для сплава BTZ-1 (рис. 12), что удовлетворяет требованиям стандартов.

Режимы термической обработки поковки из сплава BTZ-1 выбраны согласно работам [9, 10]. 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. 3 приведены механические свойства поковки диаметром 1950×160 мм из жаропрочного титанового сплава BTZ-1 после термической обработки.

№ образца	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	$KCU_{1,2}$ Дж/см ²	НВ, МПа
1	1120	10	26	35	321
2	990	10	26	40	320
3	990	10	24	38	326
4	970	10	27	35	318
ОСТ 1.90197–89	940... 1140	≥ 8	≥ 20	≥ 30	269... 363

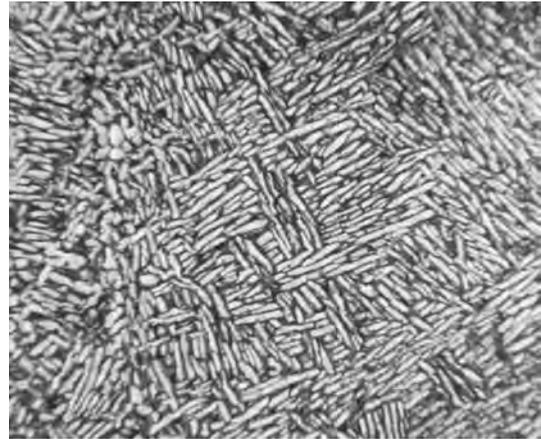


Рис. 12. Микроструктура поковки титанового сплава BTZ-1, ×500

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 Бриггса по методике испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 9012–58.

Как видно из табл. 3, крупногабаритная поковка диаметром 1950×160 мм титанового сплава BTZ-1 по механическим свойствам удовлетворяет требованиям стандарта. Исследования показали, что свойства диска диаметром 1900×150 мм из жаропрочного титанового сплава BTZ-1, изготовленного из слитка, выплавленного по разработанной технологии ЭЛПЕ, отвечают всем требованиям, предъявляемым промышленностью к качеству жаропрочных титановых сплавов. При этом диск изотропен по механическим свойствам.

Таким образом, технологические процессы ЭЛП, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, позволяют получать высококачественные слитки титана и его сплавов с однородной бездефектной структурой за счет использования более дешевого исходного сырья и увеличения сквозного выхода годного металла снизить себестоимость титановых полуфабрикатов, повысить конкурентоспособность и расширить области применения титана для нужд энергетической промышленности.

Выводы

1. Впервые в мире способом ЭЛПЕ получены слитки жаропрочного титанового сплава BTZ-1 диаметром 840 мм.

2. Комплексные исследовательские работы показали, что свойства полуфабрикатов, изготовленных из слитков ЭЛПЕ, отвечают всем требованиям, предъявляемым промышленностью к качеству жаропрочных титановых сплавов.



3. Показано, что технологический процесс изготовления крупногабаритных дисков из металла, полученного способом ЭЛП, обеспечивает достижение значительного уровня прочностных характеристик в сочетании с высокими значениями пластичности и ударной вязкости, а распределение характеристик механических свойств по объему исследованных дисков свидетельствует об однородности механических свойств и реализации преимуществ технологического процесса не только для поверхностных зон дисков, но и по всему сечению поковок.

4. Исследования структуры и свойств, выполненные по объему крупногабаритного диска из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1, позволяют расширить область надежного применения.

1. Тригуб Н. П., Жук Г. В. Разработка прогрессивных технологических схем производства титановой продукции в ИЭС им. Е. О. Патона // Современ. электротехнология. — 2008. — № 4. — С. 7–9.
2. Развитие электронно-лучевой плавки титана в ИЭС им. Е. О. Патона / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. А. Березос // Там же. — 2008. — № 3. — С. 22–24.

3. Производство крупногабаритных слитков жаропрочных сплавов на основе титана способом электронно-лучевой плавки / Н. П. Тригуб, В. А. Березос, В. А. Крыжановский, А. Ю. Северин // Там же. — 2010. — № 3. — С. 11–14.
4. Промышленная электронно-лучевая установка УЭ-5812 / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. Д. Корнейчук и др. // Там же. — 2007. — № 1. — С. 11–14.
5. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук — Киев: Наук. думка, 2006. — 250 с.
6. 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.
7. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов. — Киев: Наук. думка, 2008. — 311 с.
8. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. — Л.: Машиностроение, 1977. — 248 с.
9. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 416 с.
10. Вульф Б. К. Термическая обработка титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1969. — 375 с.

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

Поступила 15.05.2012

<http://www.vsmmpo.ru>



Корпорация «ВСМПО-АВИСМА» и компания Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd. (SAMC) подписали долгосрочный контракт о закупке титановых штампованных изделий для самолета COMAC C919

Корпорация «ВСМПО-АВИСМА», российский производитель титановых, алюминиевых и стальных полуфабрикатов, поковок, штамповок и деталей с черновой механической обработкой, и компания Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd. (SAMC), центр COMAC по окончательной сборке и производству, являющийся одним из трех ключевых центров COMAC, подписали долгосрочный контракт на закупку штампованных изделий из титана для авиационной программы COMAC C919.

Сотрудничество Корпорации «ВСМПО-АВИСМА» и предприятий COMAC началось на начальной стадии программы C919. При этом значительная часть работы по дизайну и разработке была осуществлена совместно с шанхайским институтом Shanghai Aircraft Design and Research Institute (SADRI), который является главным конструкторским институтом для программы COMAC C919.

Согласно долгосрочному контракту основная часть из большого количества деталей ответственного назначения в виде штамповок из титанового сплава будет изготовлена Корпорацией «ВСМПО-АВИСМА». Стороны также обсуждают возможность получистовой механообработки данного пакета штамповок. Срок действия этого контракта рассчитан на 10 лет — до декабря 2021 года.

SAMC (бывший Shanghai Aircraft manufacturing Factory) был основан в 1950 году. SAMC/SAMF успешно разработали первый китайский среднемагистральный лайнер (Y-10), произвели совместно с McDonnell Douglas 35 самолетов MD-82/83 и произвели окончательную сборку как основное производственное предприятие двух среднемагистральных лайнеров MD-90, 70 % конструкций которых изготовлены в Китае.

Институт Shanghai Aircraft Design and Research Institute — конструкторский и исследовательский центр COMAC, являющийся одним из трех ключевых центров COMAC. Данный институт главным образом отвечает за разработку, испытания, передовые исследования и ключевые технологии региональных и среднемагистральных самолетов.