

УДК 669.295:621762

Канд. техн. наук Д. В. Павленко, д-р техн. наук А. В. Овчинников*Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье*

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛОПАТОК ГТД

Рассмотрены перспективные технологические схемы получения заготовок лопаток ГТД из сложнелегированных титановых сплавов. Показано, что применение схемы интенсивного уплотнения металлических порошков, позволяет получать лопатки, обладающие повышенными технико-экономическими показателями.

Ключевые слова: лопатка, титановый сплав, заготовка, вакуумный переплав, металлургия гранул, порошки титана, порошковая металлургия, интенсивная пластическая деформация.

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) являются одними из самых сложных технических систем, воплощающих в себе новейшие материалы, технологии и конструкторско-технологические решения. Непрерывное совершенствование конструкции двигателей неразрывно связано с разработкой новых материалов, обладающих повышенным уровнем всего комплекса эксплуатационных свойств и технологий их обработки. Однако такая тенденция сопровождается и увеличением стоимости как применяемых материалов, так и газотурбинных двигателей в целом.

Широкое применение в ГТД титановых сплавов с одной стороны привело к повышению их технического уровня, а с другой – к повышению себестоимости. Повышение технического уровня связано с удельными прочностными характеристиками титановых сплавов, в то время как повышение себестоимости, в первую очередь, связано с затратами на получение полуфабрикатов [1] и их обработкой [2]. Учитывая наблюдаемую тенденцию к непрерывному увеличению объема применения титановых сплавов во всех отраслях промышленности и авиации в частности [1–3], проблема необходимости снижения себестоимости полуфабрикатов титановых сплавов и их обработки в дальнейшем будет еще более обостряться.

Для деталей ГТД изготавливаемых из титановых сплавов, например лопаток компрессора, наиболее рациональным путем снижения себестоимости является удешевление технологического процесса изготовления заготовок из исходного сырья.

Так, известно, что в общей себестоимости изготовления лопаток ГТД доля, приходящаяся на этап получения деформированных полуфабри-

катов достигает 40...45 %. Существующие на сегодняшний день технологии снижения стоимости заготовок, основанные, в первую очередь, на использовании методов порошковой металлургии позволяют существенно снизить как себестоимость получения заготовок, так и стоимость их последующей механической обработки. Однако такие технологии не позволяют получать в заготовках уровень физических, механических и служебных свойств достаточный для производства высоконагруженных деталей ГТД, таких как лопатки компрессора.

В связи с этим в настоящее время актуальной является проблема снижения себестоимости получения заготовок из титановых сплавов при неизменном повышении комплекса их прочностных свойств.

Повышение прочности при одновременном снижении себестоимости изготовления являются условиями взаимно противоречащими, порождающими научно-техническую проблему, которая на сегодняшний день является практически нерешенной. Разрешение указанного противоречия может быть достигнуто путем дальнейшего развития и совершенствованием технологических процессов, основанных на методах порошковой металлургии.

Целью настоящей работы является анализ перспективных технологических схем изготовления титановых полуфабрикатов, обеспечивающих высокий уровень их физических, механических и специальных свойств при существенном снижении затрат ресурсов и, как следствие, себестоимости деталей.

Всю технологическую цепочку от титановой руды к готовой детали, например лопатке компрессора ГТД, можно условно разделить на три этапа.

1. Получение металлического титана.
 2. Получение деформируемых полуфабрикатов, по габаритам, структуре, химическому составу и механическим свойствам удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к исходным заготовкам лопаток компрессора ГТД.

3. Получение лопаток ГТД путем механической обработки исходной заготовки и отделочно-упрочняющей обработки готовой детали.

Анализируя развития технологий на каждом из указанных этапах можно отметить, что в последние годы достигнуты определенные успехи в разработке более дешевых способов извлечения металлического титана из рутила [4–6]. В частности, перспективным считают метод FFC-Cambridge, основанный на прямом восстановлении оксида титана электролитическим способом. Прогресс в области получения дешевого исходного сырья может в ближайшем будущем привести к снижению стоимости порошков титановых сплавов, однако, существенное снижение стоимости готовых изделий может произойти при условии уменьшения затрат также на втором и третьем этапах технологической цепочки.

Рассмотрим основные существующие и перспективные технологические схемы, позволяющие реализовать этап получения титановых полуфабрикатов из металлического титана. В настоящее время известны и применяются четыре технологических схемы переработки титановой губки и получения деформированных полуфабрикатов, которые можно разделить на схемы, основанные на переплаве титана губчатого, и схемы уплотнения. К ним относятся:

- переплав титановой губки и последующая деформационная обработка слитков;
- уплотнение порошковых смесей с последующим спеканием;
- получение, последующее уплотнение и спекание металлических гранул;
- интенсивное уплотнение порошковых смесей с последующим спеканием.

Каждая из приведенных технологических схем обладает как преимуществами, так и недостатками. Рассмотрим их суть и возможности с точки зрения получения качественных полуфабрика-

тов для изготовления лопаток ГТД и их себестоимости.

Технологическая схема, основанная на переплаве (рис. 1), включает плавление предварительно шихтованной и спрессованной титановой губки в инертной атмосфере и формование слитков из расплава [7]. Для получения качественных слитков, с равномерным распределением легирующих элементов по сечению, например при вакуумно-дуговом способе переплава, выполняют двойной или тройной переплав. Затем слитки перерабатывают в полуфабрикаты или готовые к использованию изделия, такие как листы, прутки, трубы и изделия иных форм, с помощью методов горячей деформационной обработки, таких как ковка, прокатка и экструзия. Для формирования специального типа структуры после деформационной обработки выполняют термическую обработку предварительно механически обработанных слябов.

Основными преимуществами схемы переплава, по сравнению с конкурирующими, являются удаление вредных примесей (в том числе хлора) и обеспечение равномерного распределения легирующих элементов по всему сечению слитка. Однако схема переплава обладает рядом существенных недостатков. К наиболее значимым из них следует отнести сложность реализации вакуумного переплава, значительную ресурсозатратность многостадийного переплава и последующей деформационной обработки. К недостаткам маршрута переплава можно отнести и невозможность получать сплавы с содержанием специальных легирующих элементов, например с гидроксиапатитом, широко востребованные в биомедицине для производства имплантатов. Также к существенному недостатку схемы переплава можно отнести невозможность получения небольших объемов сплавов, широко востребованных в опытно-производстве. Существующие промышленные печи для вакуумного переплава позволяют получать слитки массой более одной тонны, что существенно ограничивает возможность проведения экспериментальных исследований по получению и исследованию свойств новых титановых сплавов.

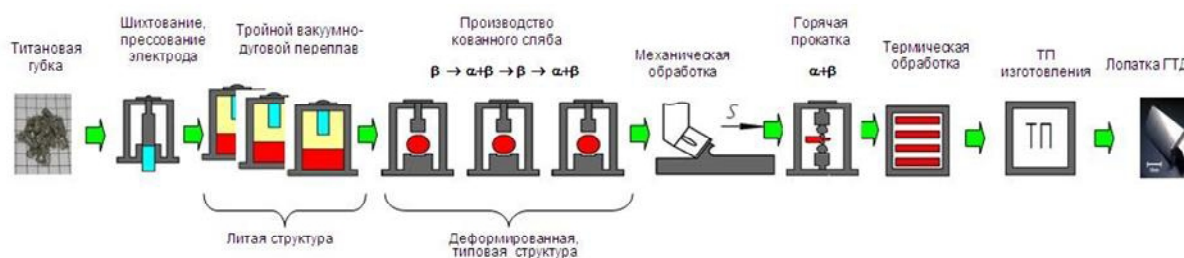


Рис. 1. Структура технологического процесса получения лопаток ГТД, основанная на схеме переплава титана губчатого (ТП – технологический процесс изготовления лопаток ГТД)

В последнее время активно исследуется и внедряется в серийное производство технология получения полуфабрикатов и деталей ГТД, основанная на металлургии гранул [8]. Получение полуфабрикатов из гранул включает такие операции как приготовление расплава, по химическому составу соответствующего заданному сплаву; получение гранул (используются методы центробежного распыления заготовок, оплавляемых плазменной дугой, распыления расплава сжатыми инертными газами, центробежного распыления расплава и др.); рассев и сепарация гранул; дегазация гранул и засыпка их в герметичные металлические или керамические формы; компактирование гранул в заготовки с плотностью, близкой к теоретической, методами горячего изостатического прессования (в газостатах или высокотемпературных гидростатах) или в контейнерах обычных гидравлических прессов (рис. 2). Первичное компактирование может дополняться прессованием, ковкой или штамповкой. Компактные заготовки подвергают термической и механической обработке.

Основными преимуществами технологической схемы получения полуфабрикатов из металлических гранул являются: отсутствие в больших объемах зональной ликвации, высокая однородность состава, структуры и свойств изделий из сложнолегированных сплавов, значительно меньшая чувствительность свойств к размерам заготовок и деталей; измельчение структуры сплава в сочетании со смещением фазовых равновесий по диаграмме состояния; возможность изготов-

ления деталей или точных заготовок сложной формы при минимальной трудоемкости; сокращение расхода металла; а также возможность получения изделий из сплавов с различным содержанием легирующих элементов, создание нового класса материалов переменного химического состава, обеспечивающих значительное повышение механических, эксплуатационных и специальных свойств.

К недостаткам схемы можно отнести высокую ресурсозатратность на этапах получения металлических гранул и горячего изостатического прессования, а также общую ресурсозатратность. Высокую себестоимость получения полуфабрикатов по данной технологической схеме можно объяснить тем, что она не только не исключает операции вакуумного переплава, но и дополнительно содержит такие труднореализуемые и ресурсозатратные операции как получение металлических гранул, горячее изостатическое прессование и спекание.

Перспективными, с точки зрения получения заготовок с низкой себестоимостью, являются технологические процессы, основанные на методах порошковой металлургии [9]. Технологический процесс, основанный на схеме прямого уплотнения порошков (рис. 3) включает в себя такие операции как дробление губки на отдельные частицы, как правило, частицы порошка, и прямое уплотнение частиц в полуфабрикаты с применением стандартных методов порошковой металлургии, таких как уплотнение прокаткой, в жестких матрицах, взрывом и другие.

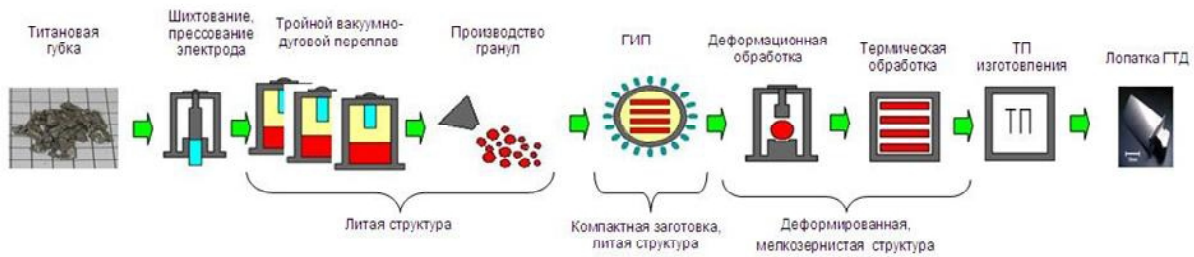


Рис. 2. Схема технологического процесса изготовления лопаток ГТД из металлических гранул (ГИП – горячее изостатическое прессование; ТП – технологический процесс изготовления лопаток ГТД)

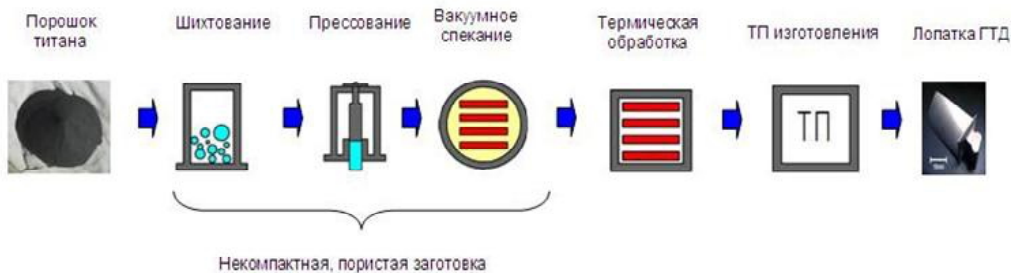


Рис. 3. Структура технологического процесса получения лопаток ГТД, основанная на схеме прямого уплотнения порошков (ТП – технологический процесс изготовления лопаток ГТД)

Преимуществами данной технологии являются низкая ресурсозатратность отдельных этапов и суммарная ресурсозатратность получения титановых полуфабрикатов, простота и доступность оборудования, отсутствие текстуры полуфабрикатов и готовых изделий, возможность получения сплавов с различным содержанием легирующих элементов, а также возможность получения небольших полуфабрикатов из новых сплавов в условиях мелкосерийного типа производства. Не менее важным является также снижение стоимости полуфабрикатов за счет применения порошков титана, получаемых прямым переделом титанового концентрата, а также возможность получения заготовок, близких по форме к готовым деталям, что обеспечивает высокий коэффициент использования материала.

Основными недостатками технологии прямого уплотнения порошков, препятствующими ее широкому применению для изготовления высоконагруженных деталей ГТД таких как лопатки компрессора, являются высокая остаточная пористость, ликвации легирующих элементов, плохая свариваемость по причине высокого содержания хлора и, как следствие, низкий уровень комплекса физических, механических и специальных свойств [9]. В результате, методы прямого уплотнения порошков находят очень ограниченное применение в авиадвигателестроении, например для изготовления мелкогабаритных крепежных деталей. Использование операций горячего уплотнения порошков позволяет несколько повысить уровень прочностных свойств. Так, в работе [10] показана возможность уплотнения порошков титана путем прокатки и последующего изготовления лопаток моноколеса центробежного нагнетателя. Следует однако отметить, что несмотря на прогресс в области порошковой металлургии, уровень механических свойств заготовок, получаемых методами прямого уплотнения порошков, существенно ниже чем в деформированных заготовках.

Одной из перспективных технологических схем получения титановых полуфабрикатов для лопаток ГТД, позволяющей разрешить противоречие между себестоимостью и прочностными

характеристиками, является технология, основанная на схеме интенсивного уплотнения порошков (рис. 4).

Основой данной технологической схемы является интенсивная пластическая деформация (ИПД) предварительно спрессованных из порошковой смеси и спеченных заготовок [11–14]. В процессе ИПД, за счет интенсификации сдвиговых деформаций, в условиях гидростатического сжатия, устраняется пористость, происходит гомогенизация легирующих элементов по сечению заготовки, а также формируется субмикрористаллическая структура. Последующая термическая обработка обеспечивает протекание процесса собирательной рекристаллизации зерен и формирования типовой для лопаток ГТД структуры.

В работе [15] установлено, что интенсивная пластическая деформация методом винтовой экструзии является эффективным методом устранения пористости в порошковых заготовках, полученных путем прессования и последующего спекания порошков титана. ИПД, например методом винтовой экструзии, в отличие от горячего изостатического прессования позволяет заживать поры по всему сечению заготовки. При этом турбулентное движение материала, возникающее в деформируемом сечении, способствует его перемешиванию и гомогенизации легирующих элементов.

Оптимизация режимных параметров процесса ИПД позволяет получать бездефектные заготовки различных сложнолегированных титановых сплавов, например VT3-1, VT8, по уровню физических и механических свойств, соответствующих заготовкам из проката, при существенно более низких энергетических затратах. Это, в свою очередь, позволяет снизить их себестоимость и, соответственно, себестоимость изготавливаемых из них лопаток ГТД [15].

Основными преимуществами данной технологии являются низкая ресурсозатратность отдельных этапов и суммарная ресурсозатратность получения полуфабрикатов, простота и доступность оборудования, возможность получения сплавов с различным содержанием легирующих

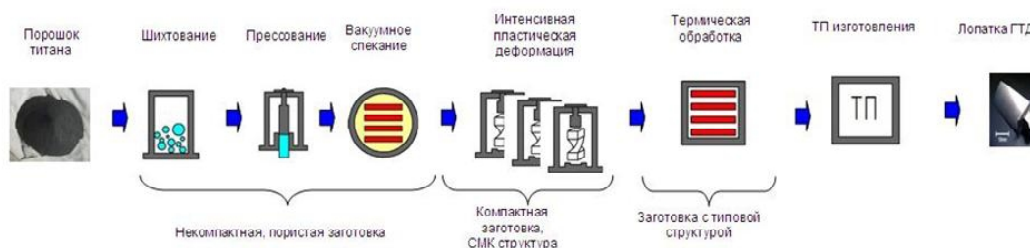


Рис. 4. Перспективная технологическая схема получения лопаток ГТД путем интенсивного уплотнения порошков (СМК – субмикрористаллическая структура материала; ТП – технологический процесс изготовления лопаток ГТД)

элементов, возможность получения малоразмерных заготовок для опытного производства, измельчение структурных составляющих до субмикроскопического уровня, что способствует повышению уровня комплекса физических, механических и специальных свойств.

К недостаткам технологии интенсивного уплотнения можно отнести ограничение габаритов получаемых полуфабрикатов и относительно низкий коэффициент использования материала деталей, изготавливаемых из полученных полуфабрикатов путем механической обработки резанием. Применительно к лопаткам компрессора последний недостаток может быть устранен за счет применения технологии получения лопаток методом выдавливания.

Расчет относительной себестоимости получения полуфабрикатов титановых сплавов, выполненный на основании экспертной оценки относительной ресурсозатратности основных операций рассматриваемых технологических схем показал, что она составляет 2,4 для схемы переплава, 1,1 для схемы интенсивного уплотнения и 2,6 для схемы, основанной на металлургии гранул. При этом ресурсозатратность операций технологической схемы оценена относительно операции тройного вакуумного переплава, ресурсозатратность которой принята равной единице.

По оценке специалистов АО «Мотор Сич», себестоимость получения тонны полуфабрикатов титанового сплава ВТ3-1 по схеме интенсивного уплотнения порошков, в условиях серийного производства, составляет 40...50 % от стоимости покупных прутков, получаемых по схеме переплава.

Таким образом, оценивая относительную ресурсозатратность рассмотренных технологических схем необходимо отметить следующее. Схема переплава является наиболее дорогостоящей. Наиболее ресурсозатратной в ней является операция многостадийного вакуумного переплава, требующая значительного расхода энергии и специального дорогостоящего оборудования. Деформационная обработка слитка также требует значительных затрат энергии т. к. сопровождается его нагревом и деформацией в β - области. Обрезка деформированного сляба приводит к потере материала.

Технологическая схема, основанная на металлургии гранул, не исключает операцию вакуумного переплава. В тоже время компактирование гранул путем ГИП происходит при значительном уровне температуры, что требует значительных расходов энергии.

Схемы прямого уплотнения и перспективная схема интенсивного уплотнения порошков являются наиболее ресурсосберегающими. Основные этапы этих технологических схем не требуют значительного нагрева заготовок и расплава

металла. Необходимый процесс вакуумного спекания прессовок является в этих схемах наиболее ресурсозатратной операцией. Однако учитывая величину необходимой температуры рабочей камеры печи и время спекания, энергетические затраты на спекание существенно ниже, чем при многостадийном вакуумном переплаве.

Из анализа технико-экономических характеристик технологических схем изготовления лопаток компрессора можно сделать вывод, что с технической и экономической точек зрения, а также учитывая возможность реализации в условиях Украины и в мелкосерийном, опытном производстве, наиболее перспективной является технологическая схема, основанная на интенсивной пластической деформации спеченных порошковых заготовок.

Список литературы

1. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справочник / Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшин И. С. — М. : ВИС-МАТИ, 2009. — 520 с.
2. Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов / [Богуслаев В. А., Долматов А. И., Жеманюк П. Д. и др.]. — Запорожье, 2000. — 250 с.
3. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева. — М. : Машиностроение, 1997. — 416 с.
4. Titanium' 2003: Science and Technology: Proc. 10th World Conf. on Titanium, 13–18 July 2003, Hamburg, Germany. Vol. 1–5. — 3425 p.
5. Червоный И. Ф. Альтернативные технологии производства титана / Червоный И. Ф., Листопад Д. А. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.74rif.ru/Ti-new.html> 18.06.2010.
6. George Zheng Chen The FFC Cambridge process for metal production: principle, practice and prospect 3rd International Slag Valorisation Symposium Leuven 19–20.03.2013 — P. 217–231.
7. Тарасов А. В. Металлургия титана / Тарасов А. В. — М. : Академкнига ИКЦ, 2003. — 327 с.
8. Металлургия гранул высокопрочного титанового сплава / В. Н. Моисеев, Н. В. Сысоева, Т. В. Ишунькина. — ВИАМ, 1995. — 8 с.
9. Металлические порошки и порошковые материалы: справочник / [Б. Н. Бабич, Е. В. Вершинина, В. А. Глебов и др.]; под ред. Ю.В. Левинского. — М. : ЭКОМЕТ, 2005. — 520 с.
10. Martin Jackson Titanium 21-St century // Materials world, May 2007. — P. 32–34.
11. Синтез сплава Ti-6Al-4V с низкой остаточной пористостью методом порошковой ме-

- таллургии / [О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, Ф. Фроес и др.] // Порошковая металлургия, 2002. — №7/8. — С. 54–64.
12. Ивасишин О. М. Экономичная технология получения титановых деталей методом порошковой металлургии / О. М. Ивасишин, А. П. Шпак, Д. Г. Саввакин // Титан. — 2006. — № 1. — С. 31–39.
13. Баглюк Г. А. Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций / Г. А. Баглюк // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка». — Випуск 24. — Луцьк, 2009. — С. 35–48.
14. Получение неспеченных гетерогенных композиционных материалов методом винтовой экструзии / [Я. Е. Бейгельзимер, М. Б. Штерн, Т. А. Епифанцева, А. С. Сынков] // Физика и техника высоких давлений. — Т. 19. — 2009. — № 3. — С. 24–36.
15. Получение деформированных заготовок из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии / [Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Е. Капустян, А. А. Скребцов] // Титан. — 2013. — № 1. — С. 17–24.

Поступила в редакцию 31.03.2014

Павленко Д.В., Овчинников О.В. Техніко-економічні аспекти технологічних схем виробництва заготовок з титанових сплавів для лопаток ГТД

Розглянуто перспективні технологічні схеми отримання заготовок лопаток ГТД зі складнолегованих титанових сплавів. Показано, що використання схеми інтенсивного ущільнення металевих порошків дозволяє отримувати лопатки, які характеризуються підвищеним рівнем техніко-економічних показників.

Ключові слова: лопатка, титановий сплав, заготовка, вакуумний переплав, металургія гранул, порошки титану, порошкова металургія, інтенсивна пластична деформація.

Pavlenko D., Ovchinnikov A. Economic aspects of technological schemes producing titanium alloys billets for gas turbine engine blades

The perspective flowsheets of receipt of purveyances of shoulder-blades of GTE are considered from the alloyed titanic alloys. It is shown that application of chart of intensive compression of metallic powders, allows to get shoulder-blades possessing enhanceable technical and economic indicators

Key words: blade, titanium alloy, stock material, vacuum remelt, metallurgy of granules, powders of the titan, powder metallurgy, severe plastic deformation.