

С. П. ПАВЛИНИЧ, М. В. ЗАЙЦЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЛИТЬЕ УЗЛОВ И ЛОПАТОК ГТД С ОБЛЕГЧЕННЫМИ ВЫСОКОПРОЧНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ

Статья посвящена исследованию влияния содержания молибдена и ниобия на механические свойства при 20 и 700 °С. В статье рассмотрена возможность применения интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД. *Интерметаллид титана; авиационный двигатель; механические свойства; структура сплава*

Создание современного авиационного двигателя – сложнейший комплексный процесс, базирующийся на новейших достижениях в области аэро- и термодинамики, материаловедения, технологии, прочности, электроники, информатики. Вместе с тем это – дорогостоящее мероприятие, осуществляемое в жёсткой конкурентной борьбе на мировом рынке авиационной техники. Огромная наукоёмкость авиационного двигателестроения подтверждается тем, что до начала XXI века полным циклом создания конкурентоспособных двигателей различного назначения обладали только США, Англия, Франция и Россия [3].

Важные задачи, решаемые при проектировании двигателей новых поколений – снижение стоимости производства и эксплуатации, в том числе путем упрощения конструкции и снижения количества деталей и узлов, требуют применения новых материалов и технологий их обработки [2].

В настоящее время повышение эффективности авиадвигателей и аналогичных силовых установок становится невозможным без использования принципиально новых конструкционных материалов. К таким материалам относятся сплавы на основе интерметаллидных фаз γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al. В связи с этим представляется интересным рассмотреть легкие сплавы на основе алюминидов титана γ -TiAl+ α_2 -Ti₃Al, которые в настоящее время рассматриваются как потенциальные конструкционные материалы для использования в области температур $T = 600 - 900$ °С. В сравнении с традиционными металлическими материалами интерметаллидные (γ + α_2)-сплавы обладают уникальным комплексом свойств. К ним относятся высокие удельные прочностные свойства и упругие модули, сохраняющиеся до высоких температур, высокие жаропрочность и сопротивление ползучести, высокое сопротивление окислению и горению. Из алюминидов титана могут изготавливаться детали газотурбинного двигателя

(лопатки, диски, элементы сопла), детали автомобильных двигателей (клапаны, шатуны, поршни, диски турбокомпрессора), теплозащитные наружные панели с ячеистым наполнителем (термоэкраны) для сверхзвуковых летательных аппаратов и др.

Широкому применению (γ + α_2)-сплавов препятствуют их низкие технологические свойства в литом состоянии, в особенности если речь идет об объемных слитках. К ним относятся хрупкость при комнатной температуре, низкая технологическая пластичность, обычно сохраняющаяся до температуры разупорядочения α_2 -фазы, высокий разброс механических свойств, низкая механическая обрабатываемость. Фундаментально это обусловлено направленным типом межатомной связи, что характерно для обеих интерметаллидных фаз. Между тем дополнительной причиной низких технологических свойств в случае слитков является грубозернистая, часто химически неоднородная структура с острой текстурой. Обычно применяемая для повышения технологических свойств литых (γ + α_2)-сплавов деформационная обработка – горячая экструзия или штамповка при температурах $\alpha/(\alpha+\gamma)$ -фазовой области, не устраняет химических и структурных неоднородностей, а высокие температуры такой обработки обуславливают ее высокую трудоемкость и стоимость. Поэтому получение качественного, т.е. химически однородного литого материала с мелкозернистой структурой и слабой текстурой является важной предпосылкой к внедрению интерметаллидных (γ + α_2)-сплавов. Во-первых, это может позволить изготавливать литые изделия с улучшенными технологическими свойствами. Во-вторых, благодаря повышению технологической пластичности существенно облегчается проведение термомеханической обработки.

Химический состав титановых сплавов системы Ti–Al, легированных молибденом или ниобием

Сплав	Фактический состав сплавов (% по массе) в состоянии										
	литом					гранулированном					
	Al	Mo	Nb	O ₂	N ₂	Al	Mo	Nb	O ₂	H ₂	N ₂
Ti – 16% Al	15,8	-	-	0,1	0,015	15,1	-	-	0,0175	0,0008	0,043
Ti – 16%Al - 5%Mo	16,4	4,7	-	0,053	0,015	15,6	4,8	-	0,1	-	0,065
Ti – 16%Al - 10% Mo	14,2	10,5	-	0,093	0,015	14,2	9,2	-	0,01	0,0016	0,028
Ti – 16%Al - 5%Nb	16,5	-	4,76	0,074	0,015	14,8	-	5,2	0,06	0,0012	0,027
Ti – 16%Al - 20%Nb	16,5	-	18	0,055	0,015	15,9	-	19,4	0,07	0,001	0,042
Ti – 13,5%Al – 21,5% Nb	13,9	-	19,5	0,050	0,015	12,9	-	20,5	0,056	0,002	0,043

Все больший интерес вызывает разработка сплавов на основе алюминидов Ti₃Al и технология получения из них полуфабрикатов и изделий практического применения в различных областях техники (в первую очередь аэрокосмической). Перспективность использования материалов на основе алюминидов титана расширяется в связи с развитием работ по созданию нового поколения гиперзвуковых воздушно-космических летательных аппаратов, причем рассматривается применение их как в элементах обшивки планера, так и в конструкциях реактивных двигателей. Фольгу из алюминидов титана Ti₃Al начинают использовать для изготовления активно-охлаждаемых сотовых панелей обшивки, многослойных полых легких валов в ракетной технике и т.д. Предполагается применить алюминид титана в монолитном виде для элементов корпуса компрессора, турбины, лопаток, камеры сгорания, диффузора и сопла двигателя [1].

Применение деталей из интерметаллидов титана в газотурбинном двигателе взамен применяемых материалов снизит общую массу двигателя и увеличит его тяговооруженность.

Достоинства сплавов на основе интерметаллидов системы Ti–Al: плотность $\rho = 3,7...4,2 \text{ г/см}^3$, высокое сопротивление окислению, ползучести, высокая прочность и модуль упругости, сохраняющиеся до 900 °С. Наряду с достоинствами у интерметаллида титана системы Ti–Al есть ряд недостатков: природная хрупкость, низкие технологические свойства, крупнозернистость в слитках. Для повышения пластичности подобных сплавов необходимо ослабить ковалентную связь между Ti и Al путем легирования элементами с большим атомным радиусом или с возможно большим числом валентных электронов. К таким элементам относятся цирконий, гафний, ниобий, молибден, ванадий.

Для исследования влияния содержания молибдена и ниобия, имеющих довольно высокие пределы растворимости в Ti₃Al, на механи-

ческие свойства при 20 и 700 °С сплавов в литом и гранулированном состоянии были выплавлены сплавы (таблица) с использованием титановой губки ТГ-100А, лигатур Al–Mo (30% Al - 70% Mo) и Nb–Ti (74% Nb - 26% Ti).

Механические свойства литого материала определяли на образцах, вырезанных из электродов, предназначенных для гранулирования, а свойства гранулированных сплавов – на прутках, полученных прессованием стальных вакуумированных капсул диаметром 90 мм с гранулами, при 1150–1180 °С. Термическая обработка сплавов состояла из высокотемпературного нагрева при 1050 или 1200 °С в течение 2 ч (охлаждение либо в воде – закалка, либо в печи до температуры старения, либо путем переноса в печь, нагретую до температуры не ниже температуры эксплуатации) и последующего старения [1].

Исследование литых сплавов показало, что они имеют крупнозернистую структуру с грубым внутризерненным строением. Легирование молибденом и ниобием не измельчает зерна, а внутризерненное строение при введении 5–10% Mo или 20% Nb становится более тонким.

Нелегированный Ti₃Al (Ti - 16% Al) имеет низкую прочность при хрупком разрушении ($\sigma_b = 120 \text{ МПа}$). Легирование сплава 5 % Mo повышает предел прочности до 770 МПа, а пластичность – до 1,5 %.

Сплавы, содержащие 5 и 10 % Mo, после закалки с 1050 °С и последующего старения при 850–900 °С имели предел прочности 540–560 МПа, $\delta = 1,2 - 1,6 \%$ и $\psi = 2 - 4\%$. Максимальная прочность ($\sigma_b = 880 \text{ МПа}$) при некоторой пластичности ($\delta = 1,6 \%$, $\psi = 2 \%$) получена для сплава Ti - 13,5% Al - 21,5% Nb после той же термической обработки.

Однако для получения удовлетворительных физико-механических свойств требуется продолжение исследований по нахождению оптимального соотношения легирующих элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скибин В. А., Солонин В. И., Сосунов В. А.** Авиационному двигателю 100 лет // ТВФ. 2004. №5
2. **Мухин В. С.** Основы технологии машиностроения (авиадвигателестроение). Уфа: УГАТУ, 2007. 148 с.
3. **Каблов Е. Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2001. 632 с.

ОБ АВТОРАХ

Павлинич Сергей Петрович, зав. каф. машин. и технол. литейного произв-ва, первый зам. ген. дир. – техн. дир. ОАО УМПО. Д-р техн. наук, проф. Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиац. промышленности.

Зайцев Максим Владимирович, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий по машинам и технологии литейного пр-ва (УГАТУ, 2008). Пишет дис. по исследованию и разработке технологии изготовления отливок узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений.