

Т. Хауптман, Г. Билхофер (Linn High Therm, Германия)

## Титановые сплавы как перспективные материалы для изготовления литых деталей в авиамоторостроении

Титан и его сплавы, включая интерметаллидные, благодаря своим физическим и химическим свойствам, а также хорошей биосовместимости широко используются в космонавтике, химической и медицинской промышленности. Поскольку интерметаллидное соединение  $\gamma$ -TiAl по сравнению с титаном имеет более низкий удельный вес, то оно используется в авиационной промышленности в качестве материала для изготовления деталей авиационных двигателей, например, турбокомпрессоров, поршней, лопаток турбин и клапанов. Благодаря низкому удельному весу материала использование лопаток турбин и турбоагрегатов из соединения TiAl (рис. 1) позволяет уменьшить массу деталей, что приводит к уменьшению расхода авиационного топлива.

Однако высокая стоимость производства изделий из титановых сплавов по сравнению с изделиями из других металлов и сплавов сдерживает увеличение доли деталей из титановых сплавов в конструкции различных механизмов. Кроме того, титановые сплавы с трудом подвергаются механической обработке, поэтому актуальной является проблема получения качественных литых заготовок из этих сплавов, требующих минимальной механической обработки.

Компания Linn High Therm совместно с ACCESS e. V. и институтом RWTH Aachen разработала и производит установку для прецизионного литья титана и его сплавов. По данной технологии можно получить отливки с толщиной стенки от 0,1 мм и очень хорошим качеством поверхности, в том числе деталей сложной конфигурации, которые не могут быть произведены методами механической обработки. Полученные литые детали требуют минимальной механической обработки и могут практически сразу использоваться по назначению. Например, крайне сложную механическую обработку тонкостенных частей колес турбоагрегата и лопаток турбины можно полностью исключить. Механическая обработка обычно заключается только в отделении от отливки литниковой системы в месте подвода питателя при помощи абразивного круга или дисковой пилы. Дальнейшая обработка может вклю-



Рис. 1. Литые детали авиационного двигателя из титанового интерметаллидного сплава

В статье представлена характеристика титановых сплавов, описаны технология и оборудование для плавки и центробежного литья титановых сплавов.

**Ключевые слова:** титан, интерметаллидные сплавы, выплавляемые модели, индукционная плавка, центробежное литье.

\*\*\*

**Hauptmann T., Billhofer H.** Titanium alloys as promising materials for manufacturing castings in aerospace.

The article presents the characteristics of titanium alloys, describes the technology and equipment for melting and centrifugal casting of titanium alloys.

**Key words:** titan, intermetallic alloys, casting wax model, induction melting, centrifugal casting.

чать такие операции, как пескоструйная очистка и полировка.

Прецизионное литье с использованием центробежных литейных модулей является методом литья, который значительно превосходит обычный гравитационный метод литья в отношении плотности материала и качества заполнения формы. Распространенные ранее методы плавки, такие, как плавка в электродуговой печи или тигельной индукционной с холодным тиглем связаны с высокими затратами из-за высокой реакционной способности титана. Технология выплавки сплава в керамическом тигле посредством индукционного тока высокой или средней частоты является энерго- и времязберегающей, требует малого пространства в заливочном комплексе при относительно низких издержках. Применение вакуума и заливочной камеры с защитным газом расширяет возможности



Рис. 2. Установка центробежного литья Supercast со среднечастотной индукционной плавильной установкой





Рис.3. Автоматическая линия для литья титана и титановых сплавов

применения установок индукционной плавки и центробежного литья. Плавка и разливка титана и титановых сплавов производится в атмосфере инертного газа или в вакууме, чтобы избежать реакции расплава с кислородом. В компактных комбинированных установках вакуумного центробежного литья возможно реализовать производство точных отливок в вакууме или в атмосфере защитного газа без значительных материальных и временных затрат, в том числе при единичном и мелкосерийном производстве. Кроме титановых сплавов на данных установках можно производить отливки из сталей, сплавов на основе кобальта, хрома, меди, магния и других.

Компания Linn High Therm производит широкий спектр установок – от маленьких, с максимальной массой плавки 40 г до больших установок Supercast с массой выплавляемого сплава до 3,5 кг (рис. 2). В таких установках возможно литье как в металлические литейные формы, так и в керамические формы, изготавливаемые по выплавляемым моделям. Размер изготавливаемых деталей варьируется от 1 до 300 мм. Компания Linn High Therm также производит печи для выплавки моделей, нагревательные печи и печи для термической обработки отливок.

Для производства отливок из титана и интерметаллидных титановых сплавов на основе TiAl компания Linn High Therm предлагает использовать автоматическую линию, на которой необходимые нагревательные печи, печи термической обработки и устройства центробежного литья объединены в одно функциональное устройство (рис. 3).

Установки центробежного литья также возможно применять для подготовки образцов к спектроскопии. Данные установки обеспечивают по сравнению с традиционными способами подготовки образцов такие преимущества, как хорошая воспроизводимость результатов, низкие потери выплавляемого материала и высокую производительность.

Для прецизионного литья по выплавляемым моделям плавильные тигли и формы делают из много-

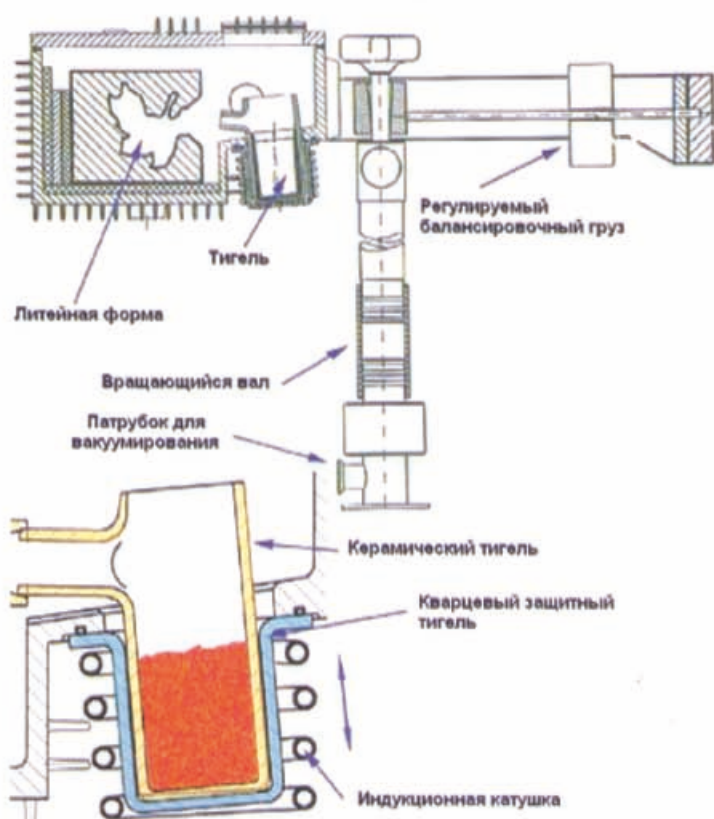


Рис. 4. Схема установки центробежного литья титановых сплавов

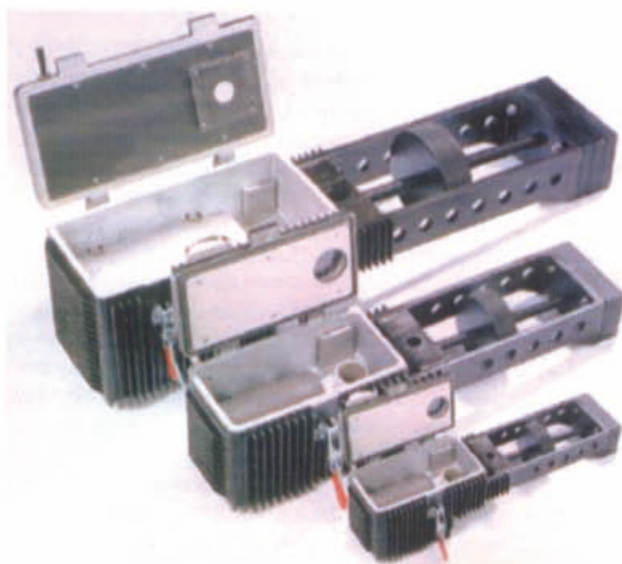


Рис. 5. Разливочный рычаг установок Supercast, Titancast и Platicast

слойной керамики, которая адаптирована для плавки материала и желаемой геометрии детали. Слиток (шпиготная заготовка) выплавляемого сплава помещается в плавильный тигель, который вставляется в разливочный рычаг (рис. 4 и 5). Предварительно подогретая литейная форма устанавливается в разливочный рычаг напротив плавильного тигля.

В случае необходимости в разливочной камере создается вакуум, и в нее поступает несколько потоков инертного газа. Такая схема используется для ти-





Рис. 6. Выплавляемые модели, собранные в модельные блоки



Рис. 7. Модельный блок, покрытый огнеупорной суспензией и зернистым наполнителем

тана и интерметаллидных титановых сплавов. Катушка индуктора перемещается от пода до края плавильного тигля и шихтовая заготовка быстро плавится. После достижения температуры разливки индуктор опускается и начинается процесс центробежной разливки. За счет вращения разливочного рычага с высоким ускорением вокруг вертикального вала создается центробежная сила, под воздействием которой жидкий расплав переливается из плавильного тигля в предварительно подогретую литейную форму. Благодаря непрерывному вращению центробежная сила остается постоянной во время затвердевания отливки, в результате чего затвердевающая отливка постоянно подпитывается расплавом. После затвердевания расплава литейная форма извлекается из разливочного рычага. Если материал отливки требует термообработки с определенными температурными режимами и в определенной атмосфере, то это может быть осуществлено в печи термообработки. После остывания отливку извлекают путем разрушения керамической формы. Отливку отделяют от литниковой системы с помощью дисковой пилы и зачищают. Далее может производиться пескоструйная очистка и полировка.

Для изготовления выплавляемых моделей по оригиналу детали изготавливается силиконовая или металлическая пресс-форма. С помощью этой пресс-формы можно изготовить необходимое количество моделей. Далее выплавляемые модели собираются в модельные блоки (рис. 6), что позволяет повысить рентабельность производства.

Модельные блоки погружают в специальную огнеупорную суспензию и покрывают зернистым наполнителем. Далее происходит сушка нанесенного на модель слоя керамической формы. Для большинства отливок достаточно, чтобы керамическая форма состояла из 5–6 слоев (рис. 7).

Если конфигурация отливок сложная и существует вероятность коробления или растрескивания керамической формы в процессе вытопки модельного состава и при заливке, то готовые модельные блоки, покрытые огнеупорной коркой, помещают в специальные контейнеры из жаропрочного сплава и засыпаются силикатным или фосфатным огнеупорным наполнителем. Однако в большинстве случаев можно получить отливки в керамических литейных формах без применения опорного наполнителя. Вытопка модельного состава производится при температурах от 40 до 300°C с последующим обжигом формы при температурах

выше 900°C в зависимости от используемой керамики. Пресс-форма для литья нагревается до необходимой температуры в нагревательной печи (рис. 8), затем помещается в разливочный рычаг. Температура подогрева зависит от материала, геометрии, толщины стенки отливки и находится в диапазоне от 350 до 1100°C.

В керамическом плавильном тигле материал отливки расплавляется индукционными токами. Из-за высокой температуры расплава требуется химически и механически устойчивый материал плавильного тигля, выдерживающий термические удары. Для достижения высокой стабильности процесса требуется правильный подбор материала и профиля плавильного тигля. С помощью программ трехмерного моделирования были смоделированы процессы, происходящие с расплавом во время плавки и заливки. На основании результатов моделирования была разработана серия плавильных тиглей оптимальной формы для широкого диапазона использования. Эти плавильные тигли – часть широкой программы вспомогательного оборудования компании Linn High Therm. Поэтому обычно нет необходимости в изготовлении тигля на заказ.

Для исключения нежелательного взаимодействия материала отливки с кислородом и для качественного заполнения литейной формы остаточный кислород может быть удален созданием вакуума или продувкой инертным газом заливочной камеры. В связи с этим вакуумная система и устройство продувки инертным газом объединены в одну систему. Ось разливочного рычага представляет собой полый вал. Она соединена через роторное герметичное устройство с системой насосов (рис. 4). Промывка камеры осуществляется с помощью инертного газа, например аргона или азота.



Рис. 8. Печи для подогрева керамических форм и термообработки



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25

Обычно вакуумная система состоит из основного вакуумного насоса Рутса с производительностью 800 м<sup>3</sup>/ч и вспомогательного насоса. Такая насосная система позволяет быстро откачать воздух и обеспечивает необходимый вакуум в процессе плавки и литья. Рабочий вакуум 5 Па достигается за 20 с, максимально возможный вакуум – 0,1 Па. Специально разработанные электромагнитные газовые клапаны гарантируют высокую стабильность работы всей вакуумной системы.

Принцип индукционного нагрева сравним с принципом действия трансформатора. Водоохлаждаемая катушка индуктора (первичная обмотка) индуцирует вихревые токи в расплавляемом металле (вторичная обмотка), которые преобразуются в тепло за счет удельного сопротивления. Помимо нагрева вихревые токи перемешивают расплав, что гарантирует однородность расплава и воспроизводимость результатов для всех сплавов. Среднечастотный генератор с рабочей частотой 10–20 кГц мощностью 20–30 кВт дает возможность быстрого нагрева, что позволяет достичь минимального времени выдержки титана и титановых сплавов в тигле. Температура расплава фиксируется пирометром, который передает результаты измерения в систему управления установки.

Во время литья мощность установки и скорость вращения разливочного рычага постоянно контролируется, специальный двигатель вращает разливочный рычаг и обеспечивает точно заданное ускорение расплава, что позволяет задавать параметры разлива. Для литья титана и титановых сплавов угловое ускорение разливочного рычага было увеличено из-за ма-

лого удельного веса сплавов и высокой скорости их кристаллизации для качественного заполнения литейной формы. В зависимости от конфигурации отливки и толщины ее стенки конечную скорость вращения разливочного рычага можно плавно регулировать от 0 до 300 об./мин. Это осуществляется при помощи электродвигателя с частотным преобразователем. Установки Supercast оснащены современным контроллером Siemens S7-PLC с сенсорной панелью управления и предустановленными программами литья. Цикл плавки и литья может быть проведен в ручном или автоматическом режиме, поэтому процесс вакуумирования, продувки инертным газом, плавки и центробежного литья могут выполняться системой независимо.

Ответственные отливки сложной конфигурации из титановых сплавов очень часто требуют проведения термической обработки непосредственно после литья. Для этого отливки помещаются в печь термообработки сразу после литья, где они нагреваются до заданной температуры, выдерживаются и охлаждаются по заданному режиму. Компания Linn High Therm предлагает конвейерную печь непрерывного действия FAN или камерную печь периодического действия KS-S.

Таким образом, индукционные установки центробежного литья позволяют реализовать экономичную технологию получения сложных высокоточных отливок из титана и титановых сплавов. Из широкого ассортимента выпускаемых компанией Linn High Therm установок можно выбрать плавно-заливочные установки центробежного литья для производства как мелких, так и крупных отливок из титановых сплавов в единичном и серийном масштабе.