

УДК 621.59

**В.В. Милованова**

Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского ОНАПТ ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082.

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ

*В статье рассматриваются требования к конструкционным материалам, применяющимся в газотурбинных установках, обобщаются сведения об их свойствах и методах изготовления. Также в данной статье проводится сравнение различных конструкционных материалов, применяемых в газотурбинные установки, а также освещаются перспективы их развития и методы их усовершенствования.*

**Ключевые слова:** Газотурбинная установка - Конструкционный материал - Никелевый сплав - Монокристаллический материал - Легкий монокристалл

*The requirements for structural materials used in gas turbine installations are considered in the article, the data on their properties and methods of manufacture are summarized. Also in this article the comparing of different structural materials used in gas turbine installations is given, and the prospects for their development and methods of improvement are highlighted.*

**Key words:** Gas turbine installation - Construction material - Nickel alloy - Mono-crystal material - Light mono-crystal

### I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные газотурбинные установки должны отвечать высоким требованиям в отношении надежности, веса, производительности, экономичности и срока службы. Одновременно должен быть снижен уровень шума и выбросы в атмосферу вредных веществ. Надежность газотурбинных установок, в том числе и реактивных двигателей гражданских самолетов последних поколений, была существенно увеличена. Большой прогресс был достигнут также и в части увеличения интервалов инспекционного контроля. В частности, для реактивных двигателей, важными вехами на этом пути были следующие: создание установок со степенью двухконтурности, большей 5, и достижение температур сгорания 1850 К и более. В дальнейшем были достигнуты значения степени двухконтурности, находящиеся в пределах от 12 и 15. Современный уровень техники в строительстве газовых турбин в значительной степени был возможен благодаря значительному прогрессу в областях технологий новых материалов, новых технологий изготовления и обработки деталей. Материалы, используемые при строительстве газовых турбин, отличаются высокой прочностью и отличными механическими качествами. Важнейшие применяемые в газотурбинных установках материалы – это титановые сплавы в компрессоре и никелевые сплавы, особенно в областях очень высоких температур реактивных двигателей [1, 2, 3].

Целью работы являлось определение возможностей применения современных конструкционных материалов в различных газотурбинных установках. Задачами работы являлись: формулировка

требований к конструкционным материалам газотурбинных установок, сравнение свойств различных конструкционных материалов и описание методики их изготовления, а также освещение перспектив развития данных материалов.

### II. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Конструкционные материалы газовых турбин должны быть в первую очередь тугоплавкими, а также быть в состоянии выдерживать комбинацию тепловой, механической и коррозионной нагрузок. Из этого следуют следующие требования к конструкционным материалам газотурбинных установок:

1. Долговременная стабильность формы, высокие пределы длительной прочности и ползучести;
2. Высокая низкоциклическая усталостная прочность;
3. Высокая термо-механическая усталостная прочность;
4. Высокая высокоциклическая усталостная прочность колеблющихся деталей;
5. Минимальная деформируемость и вязкость;
6. Достаточная высокотемпературная и коррозионная стойкость;
7. Воспроизводимая технология изготовления, обработки и переработки;
8. Возможность применения неразрушающих методов контроля критических погрешностей;
9. При необходимости возможность нанесения покрытия (оксидирование, сульфидирование, нанесение термоизоляции, нанесение слоя для защиты от износа).

### III. ПРИМЕНЕНИЕ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В ГАЗОТУРБИНАХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В областях высоких температур газотурбин реактивных двигателей в основном применяются два типа жаропрочных сплавов: так называемые деформируемые сплавы (на основе, как правило, меди и алюминия) для изготовления шайб, колец и корпусов, а также литейные сплавы для изготовления рабочих и направляющих лопаток. Жаропрочные сплавы, из которых изготавливаются шайбы турбин, обладают высокими статическими и динамическими прочностными характеристиками, оптимально соответствующими областям температур до 730°C. При этом особое значение имеет кратковременная усталостная прочность, которая является основным критерием при расчете шайб турбин. Чаще всего применяется легированная сталь IN 718, из которой изготавливаются последние ступени компрессоров высокого давления и турбины.

Более высокожаропрочные легированные стали для изготовления шайб, как например, гомогенизированный сплав Веспаллой или Удимет 720 LI требуют чистого и гомогенного исходного сырья с достаточно низкой степенью сегрегации, что требует, в свою очередь, оптимизации процессов расплавления иковки. Дальнейшее увеличение температур и/или срока службы требует применения для изготовления шайб легированных сталей, изготовленных методом порошковой металлургии. Такие материалы были получены в Соединенных штатах Америки фирмами Pratt-Whitney и GE, а в Европе фирмой Rolls-Royce и в наше время начинают серийно производиться.

Все применяемые на сегодняшний день в турбинах рабочие и направляющие лопатки не куются, а отливаются. Детали сложной формы, как например, рабочие колеса турбин, отливаются целиком и имеют поликристаллическую структуру. Оптимальные прочностные свойства материала могут быть достигнуты, напротив, посредством ориентированной или монокристаллической кристаллизации сплава в Bridgman-процессе. В процессе разработки монокристаллических брешек лопаток турбин высокого давления особое внимание на сегодняшний момент уделяется повышению точности соблюдения размеров и повышению коэффициента охлаждения. Последнее достигается путем применения сложной конфигурации охлаждающих каналов внутри лопаток. В последние десятилетия были разработаны специальные сплавы для соответствующих диапазонов температур. Сплав IN 713 применяется уже давно, главным образом для изготовления направляющих и рабочих лопаток последних ступеней турбин низкого давления. Сплав IN 100 может применяться при высоких температурах (+ 30 °C по сравнению со сплавом IN 713) и отличается низкой плотностью ( $\rho = 7,80 \text{ г/см}^3$ ).

В целом свойства никелевых сплавов можно обобщить следующим образом [2, 3, 4]:

- Высокие максимально допустимые механические, тепловые и коррозионные нагрузки;
- Возможность целенаправленно изменять свойства материала путем изменения состава сплава и процесса производства;
- Перестройки кристаллической решетки происходят только при достижении температуры плавления;
- Относительно высокий коэффициент теплового расширения;
- Возможность обработки и сварки заготовок, возможность пайки;
- В отличие от титановых сплавов отсутствие износа вследствие механического трения;
- Стоимость выше, чем у стали, зато широкая доступность;
- Сравнительно высокая плотность, приблизительно в 2 раза выше, чем у титановых сплавов;
- Обработка более трудоемкая, чем у стали, из-за высокой твердости.

### IV. МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН

Лопатки турбин, изготовленные методом ориентированной или монокристаллической кристаллизации сплава, применяются с начала 80-ых годов. Они обладают высокими механическими характеристиками, а именно: пределом длительной усталостной прочности и пределом тепловой усталостной прочности при высокой коррозионной стойкости в области температур приблизительно до 1100°C. Наиболее распространена технология изготовления в соответствии с Bridgman-принципом (рисунок 1).

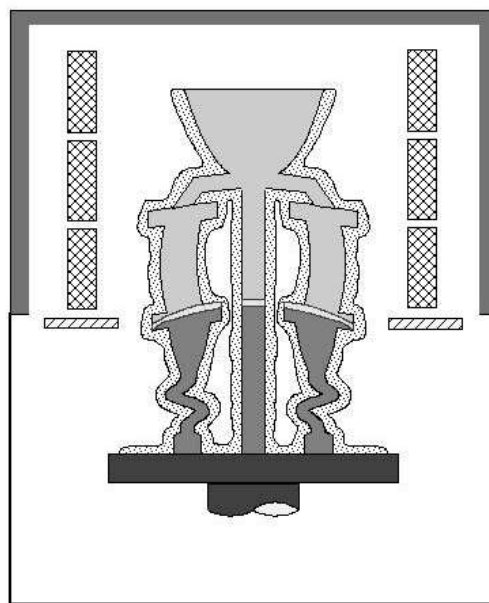


Рисунок 1 – Технология изготовления монокристаллических сплавов (Bridgman-принцип)

Вся литейная установка работает в условиях глубокого вакуума. С помощью медного кольца, охлаждаемого водой, поддерживается высокая запирающая разность температур между областью печи и холодной внутренней частью аппарата. Поддон стоит на медной пластине, охлаждаемой водой, которая опускается с точно заданной скоростью. Таким образом, можно считать, что на высоте медного кольца отвод тепла происходит только в одном направлении – вниз, причем путем теплопроводности. Тем самым создается приближенно ровный фронт затвердевания между температурами жидкой и твердой фаз. В результате получаем зернистый материал со столбчатыми (стеблевидными) кристаллами в соответствии с принципом геометрического отбора в процессе роста (избирательного роста). При этом сначала затвердевает тонкий слой, находящийся на медной пластине, он имеет сферолитовую (шаровидную) структуру с множеством произвольно ориентированных зерен. Предпочтительное прирастание зерен в направлениях  $\langle 100 \rangle$  приводит к быстрому росту случайно лежащих в этом направлении, а именно - параллельно в градиенту температуры, дендритов, а вследствие этого и к образованию столбчатых (стеблевидных) кристаллов с [001]-ориентацией в верхней части стартерного блока на медной пластине. Этот рост продолжается с регулируемой скоростью формования на всей длине детали. В результате образуется материал с колонной зернистой структурой. При монокристаллической кристаллизации рост зерен дополнительно регулируется посредством зернового фильтра спиральной формы, так называемого геликса. Альтернативным вариантом является производство монокристаллической структуры методом приращивания.

В лопатках турбин, изготовленных методом ориентированной или монокристаллической кристаллизации сплава, в принципе могут быть обнаружены те же дефекты, что и в деталях с обычным затвердением. Это, например, включения, попавшие из поддона, или шлаки, сморщивание (микропористость) вследствие недостаточной загрузки при застывании, трещины, отклонения массы [2]. Однако дополнительно могут также быть обнаружены дефекты зерновой структуры. Типичными дефектами зерновой структуры являются следующие: эквиполярные посторонние зерна и черные точки. Они появляются уже во время затвердевания в результате прирастания зерен к поддону. Также могут возникать прерванные оси дендрита, рекристаллизованные зерна, которые образовались при тепловой обработке, большие углы расхождения в ориентировании на границах зерен или дефекты в результате прирастания зерен внутри стартера.

При изготовлении сплавов методами ориентированной или монокристаллической кристаллизации различают сплавы первого, второго и третьего поколений. Сплавы DS и SC первого поколения не содержат рения (Rhenium), сплавы второго

поколения содержат приблизительно 3 % рения и сплавы третьего поколения содержат приблизительно 6 % рения. Рений в составе сплава дает следующие преимущества: сильное закалывание кристаллического сплава (сильные ковалентные связи с никелем), замедленное укрупнение зерен, повышенная температура растворения и повышенное сцепление на границах зерен. Недостатками рения являются сильная склонность к зейгероанию, образование топологически плотноупакованных фаз (TCP-фаз) и повышение плотности материала.

Оба применяемых на сегодняшний день сплава, DS и SX, изготавливаются посредством специальных техник затвердевания.

Наиболее разработанным на сегодняшний день монокристалльным сплавом является PWA 1484. Рабочая температура сплава PWA1484 приблизительно на 100 °C выше, чем сплава IN 100. Недостатками являются, однако, высокая плотность ( $\rho = 9,0$  г/см.) и высокая стоимость.

Новой разработкой является так называемый легкий монокристалл, с помощью которого можно создать на 7% более легкие лопатки турбин, чем с обычными монокристаллическими сплавами. Это позволяет создавать более тонкие шайбы турбин и корпуса турбин на основании уменьшения центробежных сил и кинетических энергий лопаток в случае поломки лопатки. Этот новый материал является результатом оптимизирования состава сплава в отношении его предела ползучести, плотности и взаимодействия вольфрама и рения. Особенно сложно было определить пограничные значения концентрации вольфрама и рения, выше которых долговечность при ползучести принимает достаточно надежные значения.

## V. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Хотя в ближайшем будущем не ожидаются большие изменения в дизайне газотурбинных установок, их производительность будет расти. Одновременно будут расти требования к снижению расходов на производство. Будет значительно улучшено конструктивное исполнение, а также будет наблюдаться значительный прогресс в конструкционной технике, технике изготовления и обработки материалов. Для тугоплавких материалов следует ожидать оптимизации их свойств, повышения требований к простоте изготовления, особенно для деталей сложной формы, к допустимым ошибкам, требования к высокой статической и циклической прочности при высоких температурах, а также к низкой стоимости изготовления. Однако в области тугоплавких материалов присутствует насущная потребность в создании более легких материалов. Существует потребность в материалах с улучшенным соотношением прочности и веса. Это относится, например, к разрабатываемым интерметаллическим материалам на основе

титана и алюминия или керамическим материалам [4]. В будущем более важную роль при проектировании должны играть аналитические процессы [5], предсказывающие возникновение дефектов материалов при их изготовлении и дающие возможность рассчитать влияние этих дефектов на надежность конструкций. Возрастет значение разработок так называемых «дизайнерских материалов», состав и процесс изготовления которых можно быстро оптимизировать для определенных рабочих условий, применяя методы итерации.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надежность и долговечность газотурбинных установок в значительной мере зависит от прочностных свойств конструкционных материалов, из которых изготовлены их детали. Поэтому вопрос о применении новых конструкционных материалов при проектировании газотурбинных установок приобретает в настоящее время все большее значение. Конструкционные материалы, применяемые в газотурбинных установках, должны выдерживать одновременно тепловую, коррозионную и механическую нагрузку, что делает необходимым переход на принципиально новые конструкционные материалы и принципиально новые технологии их изготовления.

Наиболее перспективными направлениями исследований являются разработки легких монокристаллов, позволяющих создавать более легкие лопатки турбин, чем с обычными монокристалли-

ческими сплавами. Также ожидается появление новых материалов с улучшенным соотношением прочности и веса. Это относится, например, к разрабатываемым интерметаллическим материалам на основе титана и алюминия или керамическим материалам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Y. Nakagawa**, Aero-Engine Business and Material Technologies in Japan, "Superalloys 2004", Proc. TMS & AMS, Seven Spring Conference, 2004
2. **K. Steffens** „Technik der Luftfahrtantriebe“ Vorlesungsskript RWTH Aachen WS 2002/2003, MTU Aero Engines GmbH, Munchen 2002
3. **C.W. Yee**, Materials and Processes for Affordable Propulsion Systems, "Advanced Materials for 21st Century Turbines and Power Plant", "Proc. Parsons 2000 Conference, Cambridge, 2000
4. **W. Smarsly**, Triebwerkstoffe "Quo Vadis" Tagungsband DLR Werkstoffkolloquium zu Ehren des 75. Geburtstages von Prof. Dr. W. Bunk, MTU Aero Engines GmbH, Koln/Bonn 2002
5. **N. Saunders**, et al, Modelling the Materials Properties and Behaviour of NBased Superalloys, "Superalloys 2004", Proc. TMS & AMS, Seven Spring Conference, 2004

---

Получена в редакции 04.03.2013, принята к печати 12.03.2013