

УДК 621.75

Исаев Д. А.
Исаева Е. А.
Крутина Е. В.

ВЕДУЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДИСКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

При проектировании и разработке сложнонагруженных и габаритных деталей турбины, таких как диски, к ним предъявляются требования высокой жаропрочности в области обода и одновременно высокого предела текучести в области ступицы, а также высокого сопротивления росту усталостной трещины как в области ступицы, так и обода. Данных результатов можно добиться двумя путями. Первый вариант это получение необходимых характеристик за счет соединения двух различных сплавов [1]. Второй вариант – получение градиентной структуры в одном сплаве [2, 3, 4].

Целью работы является разработка и производство газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения для ВВС с использованием заготовок деталей с дифференциальной зеренной структурой, повышение параметров ресурса и надежности современных и перспективных ГТД.

Указанные проблемы с 80-х годов прошлого столетия активно исследовались в ВИЛС, ВИАМ, ОАО «Композит» и т. д.

В работе [1] представлены исследования переходной зоны между высоколегированным гранулированным сплавом и низколегированным обычным литейным сплавом.

Соединение было получено путем консолидации в капсуле при горячем изостатическом прессовании гранул высоколегированного сплава с низколегированным компактным образцом.

В образовавшейся при соединении переходной зоне отсутствуют частицы карбидов и интерметаллидов, способных привести к преждевременному разрушению. В переходной зоне наблюдается плавное изменение концентрации элементов при перемещении от одного сплава к другому.

Однако данный положительный результат возникает не всегда. Например, в переходной зоне между литейным сплавом ЖС6У и гранульным ЭП741НП наблюдается четкая граница, состоящая из сплошного каркаса крупных (до 5 мкм) выделений γ' -фазы.

Приблизительно такая же ситуация наблюдается в переходной зоне между сплавами ЖСЗДК и ЭП741НП – в месте соединения наблюдается каркас из частиц γ' -фазы.

Обобщая эти данные, можно сделать вывод о том, что поскольку структура и фазовый состав переходной зоны формируется диффузионным путем, они будут иметь вид и даже могут меняться как в зависимости от режимов ГИП (горячее изостатическое прессование) и термической обработки, так и в процессе высокотемпературной эксплуатации.

При предварительной оценке допустимых сочетаний сплавов необходимо учитывать диффузионные характеристики входящих в их состав элементов, оценивать структурные и фазовые изменения в переходной зоне и на основании выполненного анализа выдавать рекомендации. В настоящее время существуют методы анализа для предварительной оценки [2, 3].

Применяемые технологии термической обработки дисков ГТД обеспечивают примерно одинаковые механические характеристики во всех его секциях. Вследствие этого задачи получения требуемого уровня прочности монолитных деталей в различных частях обычно решаются за счет существенного увеличения толщины диска в области ступицы, что влечет за собой негативное влияние в виде увеличения веса.

В последнее десятилетие в Китае применительно к дискам ГТД с использованием процесса быстрого лазерного формирования получены функционально-градиентные материалы, состав которых непрерывно меняется от 100 % стали 316L (аналог 03X16H15M3) до 100 % сплава Rene 88 DT (аналог ВЖ 175). Микроструктура полученного материала полностью плотная и тонкодисперсная; химический состав и твердость непрерывно меняются [5].

После анализа выше сказанного можно сделать вывод, что данные способы изготовления диска ГТД имеют следующие недостатки: высокая стоимость получения дисков ГТД из-за сложности процесса изготовления; проблема чистоты плоскости соединения при получении дисков из гранульного сплава и литейного сплава; напряжения в зоне соединения; несовместимость термообработок, т. к. используются разного рода сплавы.

С середины 80-х годов за рубежом начали проводить исследования и разработку технологий получения дисков, имеющих градиентную структуру, обеспечивающую различный уровень термомеханических характеристик монолитной детали в различных ее объемах. В России не уделялось должное внимание подобным технологиям.

Гомогенизацией выше $T_{n.p.\gamma'}$ с последующей выдержкой при температуре ниже $T_{n.p.\gamma'}$ одна стадия старения обеспечивает стойкую к развитию усталостных трещин структуру укрупненного зерна.

Медленное охлаждение обода по сравнению со ступицей обеспечивает оптимальную комбинацию прочности и скорости роста усталостной трещины [6]. Фирмой УТ отработана технология и запатентована установка для получения дисков с двойной микроструктурой [7].

На рис. 1 показано расположение заготовки диска 1 в запатентованной установке, которая имеет фундамент 3 с открытой решеткой 4 в ее центре. На фундаменте расположен слой изолирующего материала 5, на который укладывается слой жесткой графитовой обшивки 6. На эту обшивку устанавливают дополнительную кольцевую изоляцию 7 из известного промышленного высокотемпературного волокнистого материала fiberfax.

Сборка 8 включает в себя поднимающий стержень 9, опору диска 10 и опорное кольцо 11, служащее для фиксации заготовки диска и обеспечения его охлаждения. Позиции 12, 13 – медные токоподводы для передачи энергии индуктору.

Над верхними шунтами 13 также укладывается кольцевая термоизоляция fiberfax 14, затем размещают дополнительный слой жесткого графитового картона 15. Диск обертывается проводящим материалом 16, который установлен на жестком графитовом слоистом картоне 6. Вокруг токопроводящего материала 16 расположен в несколько слоев графитовый войлок 17. Внешняя индукционная катушка 2, 18 охлаждается водой, внутри диска 1 расположена другая охлаждаемая водой индукционная катушка 19. Изолирующие материалы сверху и снизу диска снижают радиационные потери и температурные флуктуации во время термообработки.

На индукционные катушки 2, 18 подается напряжение порядка 250 кВ, обеспечивающее разогрев до 1180 °С в районе полотна будущего диска и 1208 °С по ободу. Измеряется термпарой, присоединенной к месту, где находится полотно будущего диска и где требуется переход от укрупненной к тонкодисперсной микроструктуре. За время термообработки, которая длится около 2 ч происходит полное растворение γ' -фазы и ее дальнейшее выделение в виде дисперсных частиц нужного размера. Графитовый токопроводящий материал 16 нагревается до температуры, обеспечивающей передачу тепла излучением диску. Одновременно этот материал также служит для снижения мощности индукционного поля на ободу диска.

Осевая часть заготовки диска охлаждается воздухом. При этом индуктор 19 дополнительно получает воздушное охлаждение. Обычно давление воздуха составляет 1,2–1,4. В результате обеспечивается одновременно отвод тепла от ступицы и достаточный температурный градиент внутри диска в ходе термообработки.

После термообработки обод охлаждается потоком жидкости, обычно гелия. Скорость охлаждения обода от 1170 °С составляет около 120–200 °С/мин, скорость охлаждения ступицы примерно в 2 раза ниже. Далее проводят отжиг при температуре на 0–93 °С ниже 1170 в течение 1–10 ч и старение при 426–981 °С продолжительностью 3–50 ч.

В разработанных позднее технологиях двойной микроструктурной обработки также отсутствует возможность проведения одновременной термообработки нескольких дисков. В этих технологиях используют специальные верхний и нижний термические колпаки для нагнетания сжатого газа к центру диска.

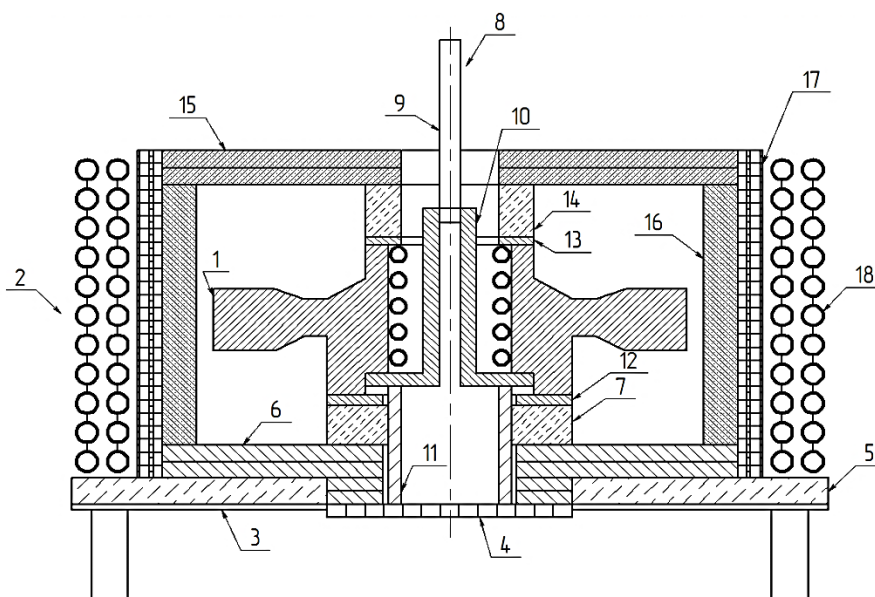


Рис. 1. Схема установки фирмы UT:

1 – заготовка диска; 2 – индукционная катушка; 3 – фундамент; 4 – открытая решетка; 5 – слой изолирующего материала; 6 – слой жесткой графитовой обшивки; 7 – кольцевая изоляция; 8 – сборка; 9 – поднимающийся стержень; 10 – опора диска; 11 – опорное кольцо; 12, 13 – медные токоподводы для передачи энергии индуктору; 14 – кольцевая термоизоляция fiberfax; 15 – слой жесткого графитового картона; 16 – проводящий материал; 17 – слой графитового войлока; 18 – внешняя индукционная катушка; 19 – индукционная катушка

Недостатками данной технологии являются: высокая стоимость из-за необходимости применения охлаждающего газа; наличие особых требований к подготовке диска; применение вакуума и индукционной катушки и, кроме того, метод позволяет производить только один диск.

Установка, разработанная и запатентованная NASA (рис. 2), представляет собой конструкцию для фиксации термообрабатываемого диска, которая состоит из термических блоков меньшего диаметра, чем диск. Блоки имеют системы крепежа и термоизоляции. Процесс может проводиться в стандартной печи с газовым топливом, например, печи известных фирм Ladish Co, Wyman-Gordon и др. После установки узла в печь производят нагрев ободной части диска от комнатной температуры до температуры выше $T_{n.p.\gamma'}$ -фазы сплава.

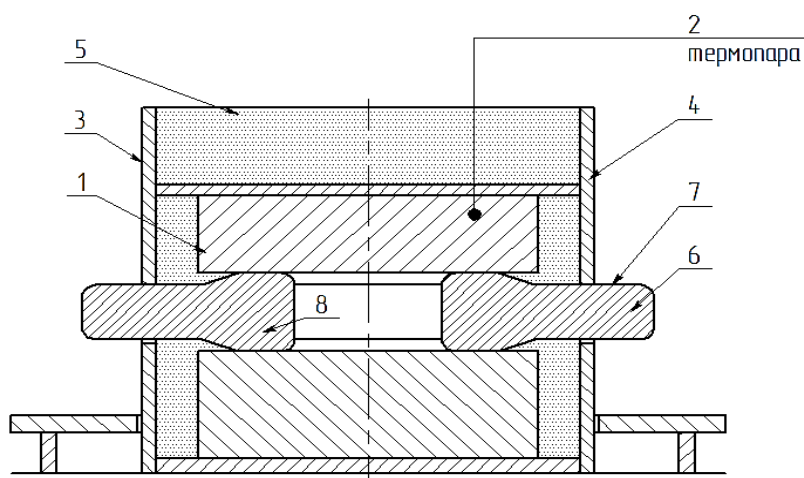


Рис. 2. Установка NASA:

1 – термический блок; 2 – термопара; 3, 4 – теплоподводящие стержни; 5 – выемка обрабатываемого узла; 6 – обод; 7 – диск; 8 – секция ступицы

При этом нагрев материала заготовки диска в термическом блоке 1 происходит значительно медленнее и для обычно применяемых дисковых сплавов температура ступичной части не успевает достичь 343 °С.

Контроль и необходимое регулирование температуры блока проводят, используя термопару 2 с индикатором, а также теплоподводящие стержни 3 и 4.

Выемку обрабатываемого узла 5 из печи производят при достижении температуры в ободной части на уровне $T_{n.p.\gamma'}$, а в термическом блоке 1 она обычно составляет примерно 315 °С. При такой термической обработке обод 6 диска 7 имеет соответственно укрупненный размер зерна. Секция ступицы 8, температура которой значительно ниже $T_{n.p.\gamma'}$, имеет тонкодисперсную микроструктуру.

Для обеспечения более быстрого охлаждения перед закалкой теплоподводящие стержни 3 и 4 удаляются. Размер зерна в центре диска соответствует примерно 10 ASTM, на ободе – 7 ASTM.

ВЫВОДЫ

Недостатками рассмотренных технологий являются большие финансовые затраты на изготовление дисков и сложность в подготовке заготовок с соответствующими характеристиками. Отсутствие контроля наличия мелких зерен в ободной части заготовки диска и необходимость создания специальной установки для обеспечения разнотермической структуры заготовки.

Разрабатываемая технология получения дисков с переменной зеренной структурой может найти широкое применение при производстве и ремонте ГТД для гражданской авиации, энергомашиностроения, нефтяной и газовой промышленности, судостроительной промышленности и железнодорожного транспорта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Особенности фазового состава и микроструктуры переходной зоны между составляющими сплавами в комбинированных заготовках из жаропрочных никелевых сплавов / Правикова Л. А., Рудницкий Е. Н., Еременко В. И., Мозолевская О. А. – М. : ВИЛС, 1991. – С. 120–121.
2. Логунов А. В. Программное обеспечение при анализе и оценке фазового состава, несоответствия параметров кристаллических решеток гамма и гамма-итрих фаз, а также критических значений электронных вакансий в жаропрочных никелевых сплавах / А. В. Логунов, А. В. Логачев, А. И. Логачева // Труды 3-й Международной инженерно-технической конференции «Металлдеформ – 2009», 3–5 мая 2009 г., Самара. – 2009. – Том 1. – С. 100–109.
3. Определение коэффициентов диффузии легирующих элементов в жаропрочных никелевых сплавах / Зайцев Н. А., Логунов А. В., Шатульский А. А., Шмотин Ю. Н. // Технология металлов. – 2011. – № 10. – С. 38–46.
4. Патент США 4820358, 1995.
5. Патент 5547523 США, 1998.
6. Логунов В. А. Температуры растворения упрочняющих интерметаллидных фаз в жаропрочных никелевых сплавах / В. А. Логунов, Н. В. Петрушин, И. М. Хацинская. – М: МИТМ, 1977. – С. 67–68.
7. Firphen I. S., Sparks R. B., Met. Prog. – 1979 april.

Исаев Д. А. – аспирант Университета машиностроения;

Исаева Е. А. – магистр Университета машиностроения;

Крутина Е. В. – канд. техн. наук, доц. Университета машиностроения.

Университет машиностроения – Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г. Москва, Россия.

E-mail: d1mon_demon@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.03.2013 г.