МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

## Реферат по дисциплине

«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ» на тему:

«Жаростойкие и жаропрочные никелевые сплавы, применяемые в авиационных двигателях, и их термическая обработка»

2001 год

В авиационных двигателях широкое применение нашли жаростойкие и жаропрочные никелевые сплавы. В качестве жаростойких применяют сплавы ХН60ВТ (ВЖ98, ЭИ868), ХН50ВМТЮБ (ЭП648), ХН68ВМТЮК (ЭП693), ХН56ВМТЮ (ЭП199) и др.

Термическая обработка сплавов в значительной мере определяется выбранной системой легирования. Так, например, сплав ХН60ВТ имеет низкую концентрацию γ′-образующих элементов, поэтому не содержит в своей структуре γ′-фазу, отличается повышенной пластичностью и не требует термической обработки после сварки. Структура сплава состоит из никелевого γ-твёрдого раствора, в котором содержится небольшое количество частиц α-W и карбидной фазы Ni3W3C и Cr23C6. однако другие сплавы, у которых повышение жаропрочности обеспечивается путём упрочнения γ-твёрдого раствора и выделения дисперсных частиц упрочняющей γ′-фазы (сплавы ХН50ВМТЮБ, ХН68ВМТЮК, ХН56ВМТЮ), подвергаются упрочнению при термической обработке, состоящей из закалки и старения.

Температура закалки выбирается из условия получения однородного твёрдого раствора. Так, например, сплав ХН50ВМТЮБ подвергают закалке на воздухе от температуры 1140°С и последующему старению при температуре 900°С в течение 5 ч, а сплав ХН68ВМТЮК закаливают от температуры 1100°С с последующим старением при температуре 900°С в течение 5 ч. При старении из пересыщенного твёрдого раствора выделяются дисперсные частицы упрочняющей γ′-фазы и сплавы упрочняются.

Наличие γ′-фазы повышает жаропрочность и одновременно сообщает сплавам склонность к образованию горячих трещин при сварке и термической обработке, необходимость в термической обработке деталей после сварки или подварки технологических, а также эксплуатационных дефектов.

Свойства жаропрочных никелевых сплавов для лопаток и дисков газовых турбин определяются термической стабильностью структуры, размерами, формой и количеством упрочняющей γ′-фазы, прочностными характеристиками γ-твёрдого раствора, оптимальным соотношением параметров кристаллических решёток γ- и γ′-фаз, распределением карбидной фазы и другими факторами. Обычно жаропрочные сплавы упрочняются путём целенаправленного многокомпонентного легирования. Суть многокомпонентного легирования состоит в обеспечении жаропрочности путём совершенствования гетерофазного строения, включающего контролируемое выделение частиц упрочняющей γ′-фазы, обеспечении её термической стабильности, целенаправленном изменении морфологии, параметров кристаллических решёток γ- и γ′-фаз, их влияния на дислокационную структуру сплавов, а также на протекание диффузионных процессов.

Основные требования к материалам для лопаток турбин обусловлены самим развитием конструкции двигателей, непрерывным повышением жаропрочности, пластичности, сопротивления термической и малоцикловой усталости, стойкости к воздействию газовой среды. Материалы для лопаток турбин современных двигателей должны обладать высокой сопротивляемостью разрушению при термической и малоцикловой усталости, которая является в настоящее время основным видом разрушения. Опасность разрушения усугубляется поверхностными реакциями, связанными с газовой коррозией, разупрочнением границы зёрен.

Для изготовления лопаток турбин исползуют деформируемые и литейные сплавы. Деформируемые сплавы обладают ограниченными возможностями обеспечения необходимой жаропрочности, поскольку дальнейшее их легирование ведёт к практически полной потере их технологической пластичности при деформации. Ведущее место среди жаропрочных сплавов принадлежит литейным сплавам, новым направленно кристализованным и монокристализованным сплавам, которые широко применяются в современных высокотемпературных двигателях. Совершенствование технологии литья и многокомпонентного легирования обеспечило существенное увеличение рабочей температуры сплавов, причём и направленные и монокристаллические сплавы группы ЖС стали более пластичными. Предельные рабочие температуры нагрева деформируемых сплавов не превышают 1000°С.

Широкое распространение нашли деформируемые сплавы ЭП109, ЭП220, ЖС6КП и литейные ЖС6К, ЖС6У, ЖС6Ф, ВЖЛ12У, ЖС30, ЖС26, ЖС32 и др.

Термическая обработка сплавов состоит из закалки и старения. Закалка производится при температурах 1220-1280°С в течение 3-5 ч. Отливки деталей получают методом точного литья по выплавляемым моделям и закаливают в вакууме. Упрочняющая γ′-фаза выделяется в основном в процессе охлаждения. В процессе старения при температуре 950°С в течение 2 ч происходит дополнительное незначительное выделение частиц γ′-фазы и упрочнение сплавов.

Окончательная структура сплавов состоит из легированного твёрдого раствора на никелевой основе, γ′-фазы и карбидов. Макроструктура сплава ЖС6ФНК содержит поперечных границ зёрен, а сами зёрна обычно ориентированы по длине лопатки в направлении ребра гранецентрированной решётки.

Сплавы обладают высокими механическими свойствами.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Марка материала | Термическая обработка | Механические свойства |
| σВ900, МПа | σ1001000, МПа | σ100900, МПа | δ, % |
| ЭП109 | Закалка с 1220°С 5 ч и старение при 950°С 2 ч | 650 | 150 | 270 | 6 |
| ЖС6КП | Закалка с 1220°С 4 ч и старение при 900°С 16 ч | 770 | 160 | 270 | 6 |
| ЖС6У | Закалка с 1230°С 3 ч и старение при 950°С 2 ч | 800 | 165 | 330 | 5 |
| ВЖЛ12У | » » | 780 | 150 | 320 | 5 |
| ЖС6Ф-НК | » » | 850 | 180 | 450 | 12 |
| ЖС26 (ВСНК) | Закалка с 1260°С 4 ч  | 880 | 200 | 410 | 8 |
| ЖСЗ2 (монокр) | Закалка с 1280°С 4 ч  | 960 | 250 | 475 | 18 |

Деформируемые сплавы ЭП109 и ЖС6КП применяются при температурах на металле не более 950°С, а сплавы ЖС6У, ВЖЛ12У и ЖС6ФНК имеют более высокие допустимые значения температур в эксплуатации, соответственно 1000°С для ЖС6У и ВЖЛ12У и до 1050°С для ЖС6ФНК. Отсутствие поперечных границ зёрен, более низкий модуль упругости и более высокая пластичность сообщают сплаву ЖС6ФНК повышенную долговечность при воздействии высоких температур и циклических термомеханических нагрузок. Температурные ограничения применения жаропрочных сплавов с дисперсионным упрочнением обусловлены растворением, быстрой коагуляцией упрочняющей γ′-фазы и падением жаропрочности при перегревах деталей в процессе эксплуатации.

Деформируемые сплавы имеют более мелкозернистую структуру, которая обеспечивает их более высокое сопротивление усталости, тогда как литейные сплавы с равноосной структурой имеют более высокую жаропрочность.

Введение гафния в сплав ЖС6ФНК усиливает карбидную ликвацию, способствует способствует образованию в поверхностном слое карбидов Ме6С, обладающих низкой жаростойкостью и не покрывающихся при диффузионном алитировании. Наличие ванадия и титана в сплаве ЖС26 значительно снижает жаростойкость. Сплав ЖС32 не содержит титана и ванадия, а легирование алюминием, танталом и небольшой концентрацией хрома обеспечивает сплаву высокую жаростойкость.

Сплавы ЖС26 и ЖС32 с направленной и монокристаллической структурой обладают более высокой термической стабильностью, термостойкостью. Для обеспечения однородности состава и структуры по объёму отливки лопаток подвергаются нагреву при закалке в вакууме до более высоких, чем равноосные сплавы, температур. В процессе нагрева и высокотемпературной выдержки происходит растворение γ′-фазы и карбидов МеС, Ме23С6, Ме6С в твёрдом растворе на никелевой основе. При охлаждении происходит выделение упрочняющей γ′-фазы, которая обеспечивает сплавам высокие механические свойства.

Для деталей из литейных никелевых сплавов широко используется гомогенизация. При гомогенизации происходит уменьшение степени ликвации и стабилизация структуры сплавов. Гомогенизация способствует увеличению объёмного содержания дисперсных частиц упрочняющей γ′-фазы. Во время высокотемпературной выдержки растворяются грубые выделения γ′-фазы, образовавшиеся при кристаллизации. Следует, однако, отметить, что оптимизация режимов термической обработки для достижения оптимальной формы, размеров и распределения частиц упрочняющей γ′-фазы не всегда сопровождается улучшением механических свойств. Так, например, образование частиц карбидов Ме6С неблагоприятной пластинчатой формы в процессе гомогенизации и последующего охлаждения сплава ЖС6У практически сводит на нет эффект улучшения свойств путём управления структурой γ′-фазы, и в итоге после гомогенизации при температуре 1210°С длительная прочность остаётся на прежнем уровне.

Неоднородная структура сплавов образуется также и в случае недогрева до температуры полного растворения упрочняющей γ′-фазы в сплавах. Образующиеся скоагулированные частицы γ′-фазы снижают характеристики прочности и пластичности.

Однако гомогенизирующая термическая обработка деталей из сплавов направленной кристаллизации сопровождается улучшением механических свойств, поскольку упрочняющая фаза после направленной кристаллизации имеет неправильную форму и значительно укрупнена. При скорости кристаллизации 4 мм/мин размеры γ′-фазы достигают 1 мкм, тогда как после термической обработки - 0,5-0,6 мкм, причем выделения становятся однородными и равномерно распределенными по объёму. Частицы γ′-фазы существенно меньше вырастают в процессе высокоскоростной направленной кристаллизации, они даже меньше, чем у направленно кристаллизованных и затем термообработанных сплавов.

При равноосной кристаллизации скорость охлаждения сплавов почти такая же, как и при термической обработке в вакууме, поэтому частицы γ'-фазы, выделившиеся во время кристаллизации, мало отличаются по размерам от частиц, выделяющихся в процессе охлаждения при термической обработке, и дальнейшего измельчения частиц не происходит.

Термическая обработка стабилизирует структуру сплавов, увеличивает объёмное содержание γ'-фазы, уменьшает степень её неоднородности по химическому составу и по размерам, снижает уровень ликвации, что в итоге приводит к существенному повышению характеристик долговечности лопаток турбин.

Особое значение приобретает термическая обработка лопаток турбин при ремонте, когда требуется восстановить начальную структуру и свойства сплавов, претерпевших существенные изменения в процессе эксплуатации при длительном воздействии на детали термомеханических нагрузок. Своевременное восстановление тонкой структуры сплавов при ремонте обеспечивает двух-трёхкратное увеличение их ресурса.

Направленная кристаллизация сообщает сплавам повышение предела выносливости, длительной прочности и пластичности.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка сплава | ЖС6К | ЖС6У | ЖС6Ф | ЖС6К-НК | ЖС6У-НК | ЖС6Ф-НК |
| σ-1900 | 250 | 290 | 260 | 260 | 310 | 350 |
| σ1001000 | 160 | 170 | 180 | 175 | 185 | 190 |
| δ20 | 5 | 6 | 6 | 6 | 8 | 9 |

Развитие направленной кристаллизации обеспечило решение задачи получения эвтектик с ориентированной структурой, представляющих собой естественные композиционные жаропрочные сплавы. Температурный уровень их работы существенно выше, чем у сплавов с равноосной и направленной структурами. При высоких температурах основным упрочнителем жаропрочных композиционных сплавов системы γ/γ′-МеС являются волокна МеС, которые обладают высокой температурной стабильностью.

Весьма перспективными являются керамические материалы на основе Si3N4, SiC, окисленных эвтектик, которые позволяют обеспечить работу лопаток турбин высокотемпературных двигателей при рабочих температурах до 1550-2200°С.

Рассмотрим некоторые марки сплавов, применяемых для изготовления дисков турбин.

Диски последних ступеней компрессоров и диски турбин авиадвигателей подвержены высоким нагрузкам и неравномерному нагреву. Так, например, обод нагревается до 550-800°С, а ступица дисков турбин нагревается до 300-500°С. диски содержат большое количество концентраторов напряжений, поэтому материалы для дисков турбин должны иметь следующие свойства:

1. Высокую прочность и жаропрочность во всём диапазоне рабочих температур.
2. Низкую чувствительность к концентрации напряжений.
3. Высокую пластичность при длительном и кратковременном нагружении.
4. Высокое сопротивление малоцикловой усталости.
5. Стабильность структуры и фазового состава сплава.
6. Хорошую технологичность.

Выполнение этих требований достигается упрочнением твёрдого раствора, увеличением объёмног содержания γ′-фазы, контролем за выделением карбидов и γ′-фазы по границам зёрен, исключением охрупчивающих фаз и очисткой сплавов от вредных примесей.

Дисковые сплавы на основе никеля представляют собой сложнолегированные композиции, трудно поддающиеся деформированию. В них недопустимы охрупчивающие фазы типа σ, μ, χ и другие, не должно быть крупных выделений карбидов, зональных ликвационных неоднородностей.

В современных отечественных авиадвигателях применяются сплавы для дисков, не уступающие по свойствам лучшим зарубежным дисковым сплавам, а по длительной прочности превосходящие их.

В дисковых сплавах применяется принцип многокомпонентного легирования, развитый при разработке жаропрочных сплавов для лопаток турбин.

В настоящее время для изготовления дисков турбин применяются деформируемые сплавы ХН77ТЮР (ЭИ437БУ), ХН73МБТЮ (ЭИ698), ХН62БМКТЮ (ЭП742), ЭП741 и др.

# Химический состав сплавов

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка материала | Ni | C | Cr | Co | Mo | Y | Nb | Al | Ti | Σγ′, % |
| ХН77ТЮР (ЭИ437БУ) | Основа | 0,07 | 21 | - | - | - | - | 0,8 | 2,7 | 10 |
| ХН73МБТЮ (ЭИ698) | Основа | 0,08 | 15 | - | 3 | 2 | 2 | 1,5 | 2,5 | 22 |
| ХН62БМКТЮ (ЭП742) | Основа | 0,08 | 14 | 10 | 5 | - | 2 | 2,6 | 2,6 | 32 |

Штамповка до термической обработки сообщает дискам текстуру деформации, которая связана с дендритным характером кристаллизации слитков и неодинаковой пластической деформацией различных участков заготовок дисков. Увеличение количества γ'-фазы усиливает текстуру деформации дисков, ухудшает технологичность. Современные сплавы для дисков содержат до 60% упрочняющей γ′-фазы. При высоком содержании γ′-фазы усиливается неоднородность её распределения, возникает глубокая разнозернистость. Поэтому перед закалкой проводят отжиг при температурах 900-1100°С для повышения однородности зёрен.

Для получения оптимальной структуры и необходимых свойств диски подвергаются закалке и старению.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Марка стали | Термическая обработка | Механические свойства | Tэксп, °С |
| σ100750, МПа | δ, % | KCU, МДж/м2 |
| ХН77ТЮР (ЭИ437БУ) | Закалка с 1080°С, 8 ч на воздухе. Старение при 750°С, 16 ч. | 350 | 15 | 0,5 | 700 |
| ХН73МБТЮ (ЭИ698) | Первая закалка с 1120°С, 2 ч на воздухе. Вторая закалка с 1000°С, 3 ч на воздухе. Старение при 800°С, 8 ч. | 420 | 17 | 0,5 | 750 |
| ХН62БМКТЮ (ЭП742) | Первая закалка с 1150°С, 8 ч на воздухе. Вторая закалка с 1050°С, 4 ч на воздухе. Старение при 850°С, 8 ч. | 520 | 20 | 0,5 | 800 |
| ЭП975 | Закалка с 1200°С, 8 ч на воздухе. Старение при 900°С, 8 ч. | 750 | 14 | 0,45 | 850 |

Более высокая жаропрочность сплавов ЭП742 и ЭП975 обусловлена снижением содержания хрома до 8-10% и введением вольфрама, молибдена, кобальта, увеличением количества γ′-фазы до 60%. В сплаве ЭП975 суммарное содержание (W+Mo)=10-12%, а (Al+Ti)=7,5%. При увеличении суммарного содержания γ′-фазы до 60% в структуре появляется неравновесная (γ-γ′)-эвтектика, поэтому нагрев при закалке производится ступенчато, чтобы избежать оплавления эвтектики. Охлаждение дисков при закалке проводят в масле или сжатым воздухом.

Двойную закалку применяют для улучшения вязкости и пластичности сплавов. При первой закалке обеспечивается достаточно полное растворение упрочняющих фаз, гомогенизация сплава. При нагреве под повторную закалку по границам зерен выделяются и коагулируют частицы карбидов, происходит частичный распад пересыщенного твердого раствора с образование достаточно крупных частиц γ′-фазы. Карбиды выделяющиеся при 1000-1050°С, равномерно распределяются по объёму. При отсутствии второй закалки однократная закалка со старением приводит к образованию по границам зерен сплошной карбидной сетки, которая снижает пластичность.

При старении происходит дополнительное выделение частиц γ′-фазы и упрочнение сплавов. Наличие небольшого количества сравнительно крупных сферических частиц γ′-фазы, сформированных во время нагрева под вторую закалку, и мелкодисперсных выделений частиц γ′-фазы, выделевшихся при старении, обеспечивает максимальную долговечность дисков из сплавов ЭИ698 и ЭП742.

Окончательная структура сплавов состоит из γ-твердого раствора, γ′-фазы и карбидов.

Существенное расширение возможностей дальнейшего легирования сплавов для дисков обеспечивает использование металлургии гранул, когда подавляется развитие ликвации, уменьшаются размеры выделений первичной γ′-фазы и карбидов, повышается технологичность и экономичность использования металла. Размеры гранул обычно составляют 0,02-0,4 мм.

При распылении сплавов на гранулы достигается очень высокая (до 106 °С с-1) скорость кристаллизации, из грубой дендритной она становится зеренной без видимых с увеличением до 40000 частиц выделений γ′-фазы, измельчаются и частицы карбидов.

Компактирование дисков производится при температуре закалки сплавов в газостатах. Технология прессования дисков из порошков требует тщательной очистки среды от кислорода, паров воды и других примесей. Наличие пленок (Al2O3, TiO2, TiC) на поверхности гранул ускоряет разрушения. Углерод не должен соприкасаться с атмосферой на всех этапах технологий получения дисков.

В авиатехнике для изготовления валов, дисков, лабиринтов широко применяется диспергированный сплав ЭП741П. Термическая обработка дисков из диспергированных сплавов аналогична деформируемым.

Применение в металлургии гранул обеспечивает повышение коэффициента использования металла, более высокую прочность и уменьшение массы конструкции.

Следует отметить, что в процессе эксплуатации в ступицах и ободе дисков накапливается значительная локальная пластическая деформация, возникают микротрещины. В ободе происходит дополнительное выделение γ′-фазы. В итоге снижается сопротивление малоцикловой усталости.