

УДК 519.252

Ф.З. УТЯШЕВ

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ ДЛЯ РАСКАТКИ ДИСКОВ ГТД

Показана возможность формирования при раскатке регламентированной структуры в жаропрочных дисках ГТД, обеспечивающей ступице, полотну и ободу механические свойства, адекватные условиям эксплуатации. Приведены результаты обработки диска турбины из сплава ЭП962 в градиентном поле температур. В ступице сохранили микродуплексную структуру, в полотне сформировали структуру «ожерелье», а в ободе – крупнозернистую структуру. Распределение структур и их механических свойств по отдельным элементам соответствует эпюрам напряжений в быстровращающихся дисках постоянного сечения. Длительные свойства сплава в ступице остаются достаточно высокими даже при нагреве до 650°C, а при меньших температурах долговечность сплава с микродуплексной структурой в десятки раз превосходит требуемую норму.

структура, микродуплекс, ожерелье, границы зерен, сверхпластичность, раскатка, свойства

Введение

К нанокристаллическим материалам относят такие, у которых, по меньшей мере, один характерный размер структурной составляющей – зерен или выделений упрочняющей фазы и даже поверхностного покрытия не превышает 100 нм. С неформальных позиций важно, чтобы следствием малого размера структурной составляющей было радикальное улучшение физико-механических свойств материала.

Применяемые в авиадвигателестроении жаропрочные никелевые сплавы по определению и «природе» являются наноструктурированными материалами. Механические свойства этих сплавов существенно зависят не только от размера наноструктурных составляющих, в частности γ' фазы, но и от их морфологии и строения границ. Структурными параметрами и свойствами жаропрочных сплавов можно регламентированно управлять, используя определенные условия обработки. В данной работе на примере дисков ротора газотурбинных двигателей показано, что в качестве такого метода обработки рационально использовать раскатку в условиях сверхпластичности. Этот метод позволяет изготавливать диски с минимальными припусками и со

структурой, обеспечивающей жаропрочным сплавам необходимые эксплуатационные и технологические свойства.

1. Формулировка проблемы

Основная проблема использования жаропрочных никелевых сплавов связана с улучшением их эксплуатационных и технологических свойств. Первые нуждаются в повышении до уровня, отвечающего требованиям двигателя нового поколения, а вторые – в повышении пластичности и снижении сопротивления деформации сплавов, неудовлетворительные значения которых приводят к большой стоимости дисков, а также к снижению их качества.

Одним из путей решения данной проблемы является управление режимами обработки и структурным состоянием указанных сплавов в процессе изготовления из них типовых деталей ГТД [1].

2. Решение проблемы

Обычно задача оптимизации структуры в сплавах решается по отношению к эксплуатационным свойствам. При этом к структуре задаются лишь общие требования – она должна обеспечить гаран-

тированный ресурс работоспособности изделию. Необходимые для этого параметры структуры выявляют экспериментально путем подбора химического, зеренного, фазового строения сплава и проверкой механических свойств на образцах и при испытаниях деталей. В данной работе ставилась задача методологического характера – разработать метод раскатки, обеспечивающий получение в дисках регламентированной структуры в ступице, полотно и ободу, механические свойства адекватные эксплуатационным требованиям. Решение такой задачи позволяет выполнить последующую оптимизацию структуры путем указанного определения размеров зерен, выделений, соотношения фаз и других параметров при термообработке.

Для раскатки диска диаметром 550 мм выбрали высоколегированный жаропрочный сплав ЭП962, в котором наметили сформировать три состояния структуры. Первое – с крупнозернистой (КЗ) структурой и с наноразмерными когерентными выделениями упрочняющей γ' фазы. Второе состояние – с ультрамелкозернистой (УМЗ), 2-3 мкм, структурой и соизмеримыми с зернами матрицы выделениями большей части γ' фазы. Такое состояние известно так же как микродуплексная (МД) структура. Первое и второе состояния являются антиподами. При больших температурах, соответствующих стационарным рабочим режимам эксплуатации сплава, КЗ состояние обеспечивает сплаву жаропрочные свойства, а микродуплексное – сверхпластичные свойства, т.е. малое сопротивление деформации и большую степень деформации. При меньших температурах, например, при комнатной температуре оба состояния наделяют сплав высоким сопротивлением деформации, но при этом заметно больше в МД состоянии.

В качестве третьего состояния была выбрана структура «ожерелье», сочетающая крупные деформированные зерна матрицы, окруженные тонкими прослойками мелких зерен матрицы и укрупненными выделениями γ' фазы. Такая структура, как известно, обеспечивает жаропрочным сплавам опти-

мальное сочетание длительных и кратковременных свойств.

В качестве метода формирования диска с намеченными структурами как уже отмечалось, была выбрана раскатка. Этот метод позволяет деформировать заготовку в широком диапазоне температур, степеней и скоростей деформации, обеспечивает автоматическое выдерживание и изменение заданных условий обработки по температуре, степени и скорости деформации. В соответствии с поставленной задачей в ободу, нагреваемом при эксплуатации до высоких температур, сформировали КЗ структуру, в менее нагреваемом при эксплуатации полотно получили структуру «ожерелье», а в наименее нагреваемой, но наиболее нагруженной части диска – ступице, мелкозернистую структуру.

2.1. Особенности формирования регламентированной структуры

Из теории и практики обработки жаропрочных сплавов известно, что измельчить зерна матрицы и изменить тип межфазных границ в жаропрочных сплавах можно лишь в результате деформации, а обратный процесс – преобразование МД в КЗ структуру можно осуществить при термообработке.

Поскольку в состоянии поставки деформируемые жаропрочные сплавы, включая сплав ЭП962, крупнозернистые, то предварительной задачей обработки была сформировать исходную МД структуру. По сути, такая задача сводится к увеличению множества большеугловых границ, в том числе межфазных. Вследствие специфики строения матрицы и когерентных выделений γ' фазы увеличение межфазных границ возможно лишь в результате растворения и последующего негомогенного выделения γ' фазы. Особенностью такого выделения является диффузионный перенос γ' образующих элементов к растущим, коагулирующим частицам этой фазы, расположенным на малоподвижных участках границ рекристаллизующихся зерен матрицы. Как и в других металлических материалах, в жаропрочных

сплавах, может происходить рекристаллизация «на месте», т.е. без миграции границ, приводящая к формированию нанозерен в матрице. Так происходит, например, при их кручении под давлением при комнатной температуре. Однако этот процесс деформации нетехнологичен и практически невыполним в отношении крупногабаритных заготовок. Для достаточно крупных заготовок, необходимых для раскатки, был разработан процесс дробной осадки с понижением температуры горячей деформации [2]. В результате такой обработки была получена заготовка диаметром 410 мм с однородной МД структурой.

Процесс раскатки диска осуществляли на стане СРД 800. Используя возможности этого процесса, деформацию выполнили в градиентном поле температур. При этом в ступице поддерживали температуру, обеспечивающую стабильность микродулексной структуре, а в полотне и ободе температуру, обеспечившую заданный рост зерен.

После раскатки и последующей термообработке по режиму неполной закалки получили диск с регламентированной структурой. В ступице диска сформировали мелкие зерна $d_{cp} \sim 30$ мкм, в полотне – структуру «ожерелье», а в ободе – крупнозернистую с зигзагообразными границами зерен.

2.2. Механические свойства диска с регламентированной структурой

Подробно механические свойства и результаты испытаний раскатанных дисков из различных никелевых и титановых сплавов приведены в [1]. Здесь лишь отметим, что образцы с КЗ структурой, вырезанные из обода диска, показали достаточно высокие кратковременные и длительные свойства: при комнатной температуре $\sigma_b \approx 1570$ МПа, $\sigma_{0.2} \approx 1200$ МПа, $\delta \approx 20\%$; при 650 °С и нагрузке 1000 МПа время до разрушения свыше 530 часов. Аналогичные свойства образцов со структурой «ожерелье», изго-

товленных из полотна, были: $\sigma_b \approx 1610$ МПа, $\sigma_{0.2} \approx 1300$ МПа, $\delta \approx 22\%$; при 650 °С и нагрузке 1000 МПа время до разрушения свыше 450 часов. Образцы с мелкозернистой структурой, вырезанные из ступицы, продемонстрировали свойства: $\sigma_b \approx 1600$ МПа, $\sigma_{0.2} \approx 1190$ МПа, $\delta \approx 24\%$. Такое распределение свойств соответствует эпюрам напряжений в быстровращающихся дисках постоянного сечения. Следует также заметить, что длительные свойства сплава в ступичной части диска остаются достаточно высокими даже для случая её нагрева до несвойственных для эксплуатации высоких температур ~ 650 °С, а при меньших температурах, например, при 500 °С долговечность сплава с микродулексной структурой в десятки раз превосходит требуемую норму.

Заключение

Наряду с возможностью изготавливать диски ГТД с однородной структурой и свойствами раскатка позволяет также получать в них регламентированно-изменяющуюся структуру.

В сочетании с рациональной термообработкой такой процесс представляется перспективным для изготовления дисков с высокими механическими свойствами.

Литература

1. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z. Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming, ISTC Science and Technology series, Volume 3. Futurepast, Arlington, Virginia, USA, 2005. – P. 386.
2. Патент № 2119842. Россия. Утяшев Ф.З., Кайбышев О.А., Валитов В.А.

Поступила в редакцию 28.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Корзников, Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Россия.