

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ПАЗАХ ДИСКОВ ТУРБИНЫ ПРИ ИХ ТЕРМОУПРОЧНЕНИИ

© 2003 М. А. Вишняков

Самарский государственный технический университет

В статье представлена методика и результаты расчета теплонапряженного состояния в елочном пазу диска турбины в результате его термопластического упрочнения. Установлено, что метод термопластического упрочнения (ТПУ) позволяет создать благоприятное поле сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали с любой сложностью геометрической формы.

Соединение рабочей лопатки с диском елочного типа - весьма напряженное и ответственное место в конструкции газовой турбины.

При работе газотурбинного двигателя (ГТД) в соединении возникают напряжения: растяжения от центробежных сил массы лопатки и выступа обода диска; изгиба от действия на лопатку газа при движении его по тракту; изгиба от центробежных сил массы лопатки, связанные с тем, что центры тяжести сечений пера лопатки не лежат на одном направлении; кручения от центробежных сил массы лопатки и кручения от газодинамических сил, действующих на лопатку.

Наибольшее значение имеют напряжения растяжения от действия центробежных сил и напряжения изгиба от газовых и центробежных сил.

Под действием указанных выше сил и изгибающих моментов зубья соединения работают на изгиб, срез и смятие, а сечения перемычек выступов замковой части диска - на растяжение [1, 2]. Необходимо также учитывать, что выкружки на "елке" паза и впадина его основания являются концентраторами напряжений, а весь паз работает при знакопеременных нагрузках в условиях высоких температур. Все это является причиной появления в указанных элементах трещин, которые со временем выводят диск из строя.

Для предотвращения этого явления применяют как конструктивные мероприятия, так и технологические. Так, с целью обеспечения наиболее равномерного нагружения всех зубьев соединения и избежания опасной

перегрузки отдельных его элементов необходимо создать точное прилегание зубьев по всей поверхности контакта.

Однако на практике конструктивные изменения не позволяют полностью устранить все негативные явления, связанные с недостаточной долговечностью таких деталей, как лопатки и диски ГТД. В этой связи большое распространение при повышении прочностных характеристик нашли технологические методы упрочняющей обработки.

Многочисленными исследованиями установлено, что для деталей типа лопаток и дисков, работающих в условиях усиленных нагрузок и высоких температур, с целью обеспечения наибольшей долговечности необходимо создать в поверхностном слое благоприятное напряженное состояние при минимальной степени упрочнения. Метод термопластического упрочнения (ТПУ) полностью отвечает указанным требованиям. Он заключается в прогреве детали до определенной температуры (температуры начала термопластических деформаций) и ускоренного ее охлаждения водяным душем. Образующийся в результате этого температурный перепад обеспечивает создание в поверхностном слое напряжения, превышающие по величине предел текучести материала. После окончательного охлаждения всей детали в ее поверхностном слое формируется благоприятное напряженное состояние в виде сжимающих остаточных напряжений при минимальном деформационном упрочнении.

В настоящее время в теории термопластичности существует целый ряд методов, позволяющих с достаточной степенью точ-

ности осуществить расчет напряженного состояния в пластически деформированной детали. Основной задачей этой теории является определение напряжений и деформаций в неравномерно нагретом теле при наличии в нем пластической деформации. Охватить все термопластические свойства материалов, проявляющиеся в различных условиях работы, отразив все особенности протекающих процессов деформирования, в рамках единой теории - задача практически неосуществимая. Поэтому для решения технических проблем различного типа целесообразно пользоваться некоторыми частными вариантами теории термопластичности, позволяющими решить конкретную задачу наиболее простыми средствами и вместе с тем достаточно полно и правильно описать важнейшие стороны данного явления.

Технические задачи, связанные с расчетом пластических напряжений и деформаций, разделяют на несколько характерных типов в зависимости от условий нагрева и нагружения. Так, деформационная теория пластичности достаточно хорошо применима для решения задач с одноразовым нагружением детали при постоянном температурном поле или при плавном изменении температуры тела во всех его точках. Данная теория устанавливает связи между напряжениями и полными деформациями в данный момент нагружения. Теория течения, например, связывающая приращения пластических деформаций и напряжений, позволяет более полно отразить историю нагружения, что особенно важно в задачах термопластичности. Метод переменных параметров упругости, соединяя приращения деформаций и напряжений, при наличии анизотропии упругого тела дает достоверные результаты только при условии большого количества мелких шагов нагружения от внешних нагрузок и температурного поля. С учетом особенностей процесса термопластического упрочнения, а также изменений механических и теплофизических свойств материала, происходящих в процессе нагрева и ускоренного охлаждения, в расчетах напряженно-деформированного состояния детали применена теория неизотермического пластического течения с линейным анизотропным упрочнением.

Технология термопластического упрочнения характеризуется, в основном, двумя физическими процессами, протекающими одновременно:

1. Конвективная и кондуктивная передача тепла, при которой в охлаждаемом теле возникают большие температурные градиенты.
2. Неизотермическое упругопластическое деформирование тела.

В результате этих процессов в теле создается поле остаточных напряжений. Теоретический анализ процесса термопластического упрочнения сводится к последовательному решению двух задач.

1. Задача нестационарной теплопроводности с граничными условиями третьего рода (конвективный теплообмен по закону Ньютона) на заданной поверхности тела и адиабатной остальной части поверхности.
2. Задача неизотермического упругопластического деформирования тела.

Процесс нестационарной теплопроводности в твердом теле применительно к процессу термоупрочнения моделируется следующим дифференциальным уравнением энергетического баланса (закон сохранения энергии) для элементарного объема [3]:

$$\rho c \frac{dT}{dt} + \{L\}^T \{q\}^T = 0, \quad (1)$$

где ρ - плотность, c - теплоемкость, T - температура, $\{q\}^T = \{q_x, q_y, q_z\}$ - вектор теплового потока, x, y, z - направления составляющих вектора теплового потока, $\{L\}^T$ - транспонированный вектор-оператор, t - время.

Первое слагаемое уравнения (1) характеризует скорость изменения внутренней энергии элемента, а второе слагаемое - отводимую тепловую энергию.

Используя закон Фурье (уравнение теплопроводности), запишем

$$\{q\}^T = -[D]\{L\}T, \quad (2)$$

где $[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}$ - матрица теплопроводности для ортотропного материала,

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} - коэффициенты теплопроводности (для изотропного материала $K_{xx} = K_{yy} = K_{zz} = K$).

С учетом (2) уравнение (1) преобразуется к виду

$$\rho c \dot{T} = \{L\}^T ([D] \{L\} T). \quad (3)$$

В случае термопластического упрочнения коэффициенты теплопроводности и теплоемкости зависят от температуры, поэтому дифференциальное уравнение (3) является нелинейным.

Начальным условием при решении уравнения (3) является температурное поле в начальный момент времени - перед охлаждением при ТПУ:

$$T_0 = T_0(X, Y, Z, t_0).$$

Граничные условия на поверхности, где осуществляется интенсивное охлаждение при термоупрочнении, выражаются законом Ньютона для конвективной теплопередачи:

$$\{q\}^T \{n\} = h(T_s - T_b), \quad (4)$$

где $\{n\}$ - единичный вектор внешней нормали к поверхности; $h = h(t)$ - коэффициент теплоотдачи (при спрейерном охлаждении тела водой этот коэффициент сильно зависит от температуры поверхности); T_s - температура поверхности тела; T_b - средняя температура окружающей среды.

Остальная часть поверхности считается адиабатической, то есть через нее нет потока тепла.

Задача (3) - (4) решается методом конечных элементов (МКЭ) [4].

При анализе неизотермического упругопластического деформированного тела в условиях термопластического упрочнения в качестве исходных данных используются результаты теплового анализа ТПУ в виде полей узловых температур для сетки конечных элементов, рассчитанные по шагам времени. Для каждого шага решается неизотермическая задача, в которой нагрузкой является при-

ращение температуры на данном временном шаге.

Расчет теплового состояния при охлаждении толстостенных деталей криволинейного профиля проводился в ANSYS на примере елочного замка диска турбины. Данная задача решалась в трехмерной постановке. В качестве модели был взят замок и часть диска, по величине соизмеримая с размерами замка. Последнее сделано для максимального приближения методики расчета к реальным условиям процесса термоупрочнения паза диска турбины, а также с целью уменьшения размерности модели, так как нижняя часть диска практически не влияет на теплонапряженное состояние в замке. Поверхности, к которым граничные условия не прикладываются, считаются адиабатическими (без теплообмена). Для обеспечения корректности расчетов тепловой анализ проводился для варианта конечноэлементной модели с 17 888 элементами и 20 988 узлами, при этом коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ прикладывается равномерно к торцу и боковым поверхностям.

Моделирование нагрева выступа паза осуществлялось путем приложения к узлам модели температуры 700 °С. Это был первый шаг решения. В связи с тем, что на практике минимальное время спрейерного охлаждения при ТПУ составляет 3...4 с, далее к торцовой и боковой поверхностям прикладывалась тепловая нагрузка, которая действовала 3 с. В течение этого времени коэффициент теплоотдачи изменялся в зависимости от температуры охлаждаемой поверхности таким образом, что перед охлаждением при температуре 700 °С он составлял $\alpha(T) = 50 \cdot 10^3$ Вт/м²·°С, затем он постепенно повышался, достигая при 200 °С значений $\alpha(T) = 250 \cdot 10^3$ Вт/м²·°С, а после этого резко падал при 20 °С практически до уровня конвективного теплообмена. Для обеспечения необходимой точности теплового расчета интервал времени 3 с был разбит на шаги и подшаги. В дальнейшем эти значения температур были использованы при расчете напряженного состояния. Перед следующими шагами нагружения (после 3 с) температурозависимый коэффициент теплоотдачи удалялся и к тем же поверхностям прикладывалась постоянная величина $\alpha(T)$,

равная $10 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$, что приблизительно соответствует свободной конвекции (охлаждение на воздухе). Время окончания расчета выбиралось из условия равномерного охлаждения всего паза до температуры, близкой к температуре окружающей среды, и составило 24 800 с. При проведении теплового расчета была также учтена зависимость свойств материала диска - жаропрочной стали 20Х12ВНМФ (модуля упругости, коэффициента линейного расширения и т. д.), от температуры.

С целью обеспечения корректности результатов теоретических расчетов тепловых полей были проведены соответствующие экспериментальные исследования. Для реализации этой задачи был подготовлен специальный образец, вырезанный из ободной части диска турбины и представляющий собой правую половину паза диска, в который по определенной схеме были установлены хромель-алюмелевые термопары (рис. 1). Термопары 1, 2 и 3 расположены на верхней стороне выступа в отверстиях глубиной 4 мм, а термопары 4, 5, 6 и 7 - на его боковых поверхностях (термопары 6 и 7 расположены на левой половине паза, поэтому на рис. 1 они не показаны). Указанное расположение предопределено тем, что при нагреве, а он осуществлялся с применением газовой горелки, направленной на выступ между пазами, необходимо, чтобы пламя омывало все поверх-

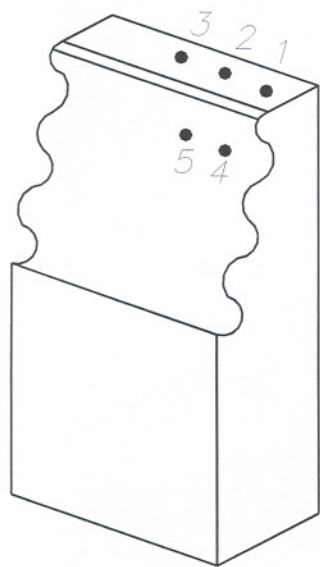


Рис. 1. Схема расположения термопар в пазу диска турбины

ности, постепенно прогревая его объем. Последующее затем спрейерное охлаждение водой должно с максимальной эффективностью обеспечить понижение температуры поверхностных слоев нагретого образца.

После расшифровки термограмм были построены графики изменения температуры в зависимости от времени охлаждения (рис. 2). Учитывая, что конструктивно газовая горелка и спрейер по отношению к боковым сторонам выступа находятся на одинаковом расстоянии, процессы нагрева и охлаждения для них производились при одинаковых условиях, о чем свидетельствует идентичность показаний приборов, поэтому при построении были взяты термопары 1, 2, 3, 4 и 5. Из графиков видно, что наиболее интенсивное охлаждение происходит на боковой поверхности образца (термопары 4 и 5). Градиент температур за 0,1 с для них составил $\Delta T = 570^\circ\text{С}$. В дальнейшем процесс охлаждения протекал плавно. Так, за последующие 0,7 с охлаждения изменение температуры составило всего 20°С . Термопара 1, установленная на расстоянии 3 мм от переднего торца образца, характеризует постепенное понижение температуры. За 0,1 с перепад ΔT составил 130°С , а с 0,1 до 0,8 с эта величина практически не изменилась ($\Delta T = 150^\circ\text{С}$). Термопары 2 и 3, установленные соответственно на расстоянии 9 и 15 мм от переднего торца образца, за 0,8 с охлаждения показали незначительное изменение температуры. Перепад за указанный период времени составил 100°С . Необходимо также отметить, что для обеспечения наибольшего эффекта теплоотдачи при термопластическом упрочнении жаропрочных сталей и сплавов в эксперименте давление охлаждающей жидкости составляло $P = 480 \dots 500 \text{ кПа}$.

На рис. 2 показаны также расчетные зависимости изменения температуры в точках модели, соответствующих месту установки термопар, при спрейерном охлаждении поверхностей выступа паза (1*-5*). Из графиков следует, что в точках 4* и 5* температура за 0,1 с резко падает с 700°С (температура нагрева детали) до 110°С . Дальнейшее снижение температуры происходит плавно, и к 0,8 с спрейерного охлаждения она становится

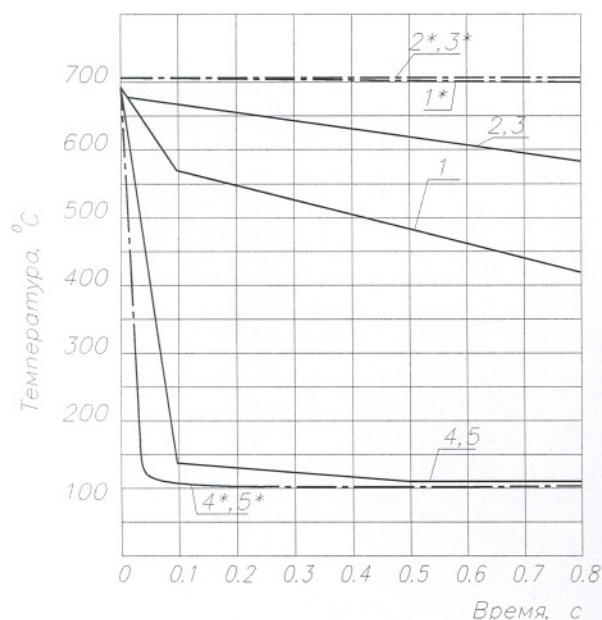


Рис. 2. Изменение температуры при спрейерном охлаждении образца из паза диска турбины

ся равной 100 °С. Термопары 1*, 2* и 3*, установленные на существенном расстоянии от торца и боковых поверхностей, начинают реагировать только через 0,2 с, и тенденция изменения температуры в этих точках характеризуется ее медленным снижением.

Сравнение результатов, полученных расчетным путем, с экспериментальными зависимостями свидетельствует о том, что при расчетах тепловых полей в пазу диска (точки 4* и 5*) получены достаточно корректные результаты, которые близки по значениям к экспериментальным (точки 4 и 5). Этот вывод подтверждает правильность выбора модели и граничных условий для расчета процесса термопластического упрочнения.

Результаты расчета остаточных напряжений в поверхностном слое элементов паза диска турбины после его термоупрочнения представлены на рис. 3. Для лучшего понимания динамики формирования остаточных напряжений была проанализирована тенденция их изменения на всех этапах охлаждения. На рисунке показаны результаты расчета остаточных напряжений, сформировавшихся на соответствующих поверхностях выступа паза (1, 2, 3 – верхняя, средняя и нижняя впадины, 4 – торец выступа, 5 – вершина зуба паза) в течение 3 секунд спрейерного охлаждения и последующих 17 секунд остывания. Видно, что на всех поверхностях

паза образуются остаточные напряжения, однако наблюдаемая картина разнородна и характеризуется тем, что для каждого элемента паза напряжения отличаются не только по величине, но и по знаку. Если проследить за изменениями во впадинах, то можно отметить, что в нижней впадине в течение всего периода спрейерного охлаждения остаточные растягивающие напряжения составляли $\sigma_0 = +(170...110)$ МПа. Подобная ситуация наблюдается и в двух других впадинах. Однако особенность последних состоит в том, что растягивающие напряжения во второй выкружке сохраняются примерно до 2,5 с, а затем в ней начинают формироваться сжимающие остаточные напряжения, которые на 3 с достигают уровня $\sigma_0 = -500$ МПа. В первой впадине начало образования сжимающих напряжений приходится на 1,3 с, и по мере увеличения продолжительности охлаждения напряжения возрастают к концу периода до $\sigma_0 = -620$ МПа. Графики 4 и 5 соответственно для торца и вершин зубьев отражают общую тенденцию появления и роста сжимающих остаточных напряжений на поверхности указанных элементов. Видно, что к концу периода охлаждения их средняя величина на торце достигает $\sigma_0 = -330$ МПа, а на вершинах $\sigma_0 = -400$ МПа. После окончания подачи воды еще некоторое время (до 5 с) на всех поверхностях наблюдается продолжение процесса

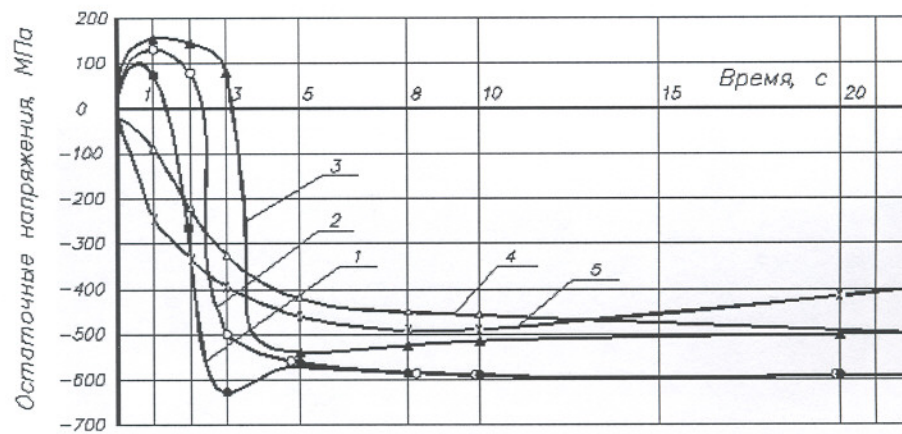


Рис. 3. Остаточные напряжения на поверхности элементов паза диска турбины при его остывании за 17 с после спрейерного охлаждения

увеличения сжимающих напряжений, однако скорость его резко упала. После этого в связи с возвратом тепла из сердцевины к поверхности происходит некоторое уменьшение величины напряжений, однако оно несущественно и составляет к 20 с не более 100 МПа.

Представленные результаты расчетов свидетельствуют о том, что процесс термопластического упрочнения обеспечивает формирование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений для деталей с любой сложностью формы.

Список литературы

1. Газотурбинные установки. Конструкции и расчет: Справочное пособие /Под общ. ред. Л. В. Арсеньева и В. Г. Тырыжкина. Л.: Машиностроение. Ленингр.отд-ние, 1978. - 232 с.
2. Конструкция и проектирование авиационных ГТД /С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов и др.; Под общ. ред. Д. В.Хромина. М.: Машиностроение, 1989. - 368 с.
3. Зарубин В. С. Прикладные задачи термпрочности элементов конструкций. М.: Машиностроение, 1985. - 296 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. - 541 с.

STRAIN DEFORMED STATE IN TURBINE DISC GROOVES UNDER THEIR THERMOSTRENGTHENING

© 2003 M. A. Vishniakov

Samara State Technical University

The paper presents the procedure and results of thermal stress state analysis in a turbine disc herringbone groove when it is subjected to thermoplastic strengthening. The thermoplastic strengthening method is found to create a propitious field of compression residual stress in a superficial layer of a part of any geometry complexity.