УДК 621.001

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2007 М.А. Вишняков, И.С. Старчевой

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье рассмотрены основные технологические и конструктивные факторы, влияющие на эффективность применения метода термопластического упрочнения для создания благоприятного напряженного состояния в поверхностном слое деталей ГТД с целью повышения их сопротивления усталости.

Одними из основных требований, предъявляемых к ответственным и высоконагруженным деталям газотурбинных двигателей (ГТД), является надежность и долговечность работы. К таким деталям, испытывающим при эксплуатации переменные нагрузки и воздействие высоких температур, можно отнести, например, лопатки и диски турбины и компрессора. Одним из направлений, обеспечивающих увеличение эксплуатационных характеристик указанных деталей и нашедших широкое распространение в условиях производства, является применение на заключительных стадиях изготовления изделий технологических методов упрочняющей обработки. В качестве таких методов, как правило, используют методы, которые основаны на поверхностном пластическом деформировании (ППД).

В последние годы многочисленными исследованиями [1, 2] установлено, что для деталей, находящихся при эксплуатации в условиях высоких температур и знакопеременных нагрузок, наиболее приемлемыми являются методы упрочнения, которые обеспечивают создание в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений при минимальной степени деформационного упрочнения. Причем именно остаточные напряжения существенным образом влияют на такую важную эксплуатационную характеристику, как сопротивление усталости материала детали. Наряду с этим, практика применения методов ППД показала, что формирование необходимых по величине и глубине распространения остаточных напряжений возможно только при создании достаточно высокой степени деформационного упрочнения, которая может достигать 3-5%.

Метод термопластического упрочнения (ТПУ) представляет собой процесс, состоящий из двух этапов: прогрева детали до температуры начала термопластических деформаций и последующего ускоренного охлаждения ее поверхностей. Данный метод позволяет создать в поверхностном слое детали значительные по величине и глубине залегания сжимающие остаточные напряжения при минимальной пластической деформации (0,5-1,0%). Результатом этого является повышение сопротивления усталости материала детали.

Рассмотрим некоторые конструктивно-технологические особенности реализации метода термопластического упрочнения.

В зависимости от размеров и конфигурации детали на практике могут быть применены следующие методы ее нагрева: поверхностный нагрев токами высокой частоты, объемный нагрев в печи и нагрев упрочняемого элемента детали пламенем газовой струи.

Первый метод может быть использован в значительной степени для изделий относительно простой формы, что ограничивает его применение для деталей газотурбинных двигателей, которые, как правило, имеют сложную геометрическую форму. Элементом нагрева во втором методе может являться муфельная печь соответствующего объема, что нашло практическое применение при термопластическом упрочнении лопаток турбины

и компрессора. Нагрев с помощью газовой струи можно применить при упрочнении отдельных элементов крупногабаритных деталей, в наибольшей степени подверженных разрушению. Примером таких элементов могут быть места соединения лопаток и дисков компрессора или турбины ГТД.

Установлено, что основными технологическими параметрами при нагреве детали, влияющими на эффективность применения указанного метода упрочнения, являются температура и время прогрева детали.

Оценка температуры начала термопластических деформаций может быть осуществлена графоаналитическим методом. Его сущность заключается в нахождении точки пересечения экспериментальных кривых предела текучести и температурных напряжений в нагретом поверхностном слое материала детали, которая и укажет искомую температуру. На рис. 1 показан пример определения указанной температуры для титанового сплава ВТ9. Как видно из рисунка, пересечение кривых температурных напряжений σ_θ и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ соответствует температуре T=680 °С. В приведенном методе использованы данные, полученные при растяжении образцов. Поскольку величина остаточных напряжений при ТПУ напрямую зависит от температуры нагрева детали, то фактические температуры начала термопластических деформаций должны быть больше, чем полученные графоаналитическим расчетом. При окончательном выборе теплового режима необходимо также иметь в виду, что процесс ТПУ не должен привести к изменению структуры или фазового состава материала детали. Поскольку полиморфное превращение для титанового сплава ВТ9 происходит при =1000±20 °С, то при дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях могут быть приняты температуры нагрева детали в пределах =800-900 °С.

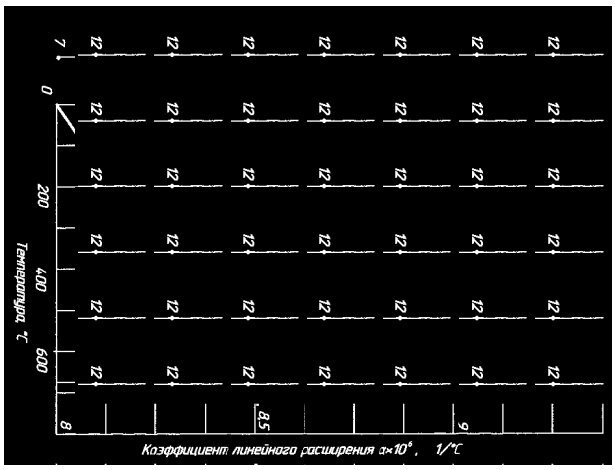


Рис. 1. Определение температуры начала термопластических деформаций для сплава ВТ9: 1 – предел текучести ; 2 – модуль упругости ; 3 – температурные напряжения s_q; 4 – коэффициент линейного расширения

При выборе верхней границы указанного диапазона изменения температур было также учтено следующее. Упрочнение сплава ВТ9 при температурах порядка 950-980 °С (вблизи границы существования – фазы) является нецелесообразным, так как это приводит к появлению фазы мартенситного типа, представляющей собой крупные зерна с грубоигольчатой внутризеренной структурой. Указанная структура имеет пониженные характеристики сопротивления усталости. Ее не удается полностью исправить даже при последующем нагреве до высоких температур (650-700 °С).

Определение времени нагрева детали с достаточной точностью определяется термометрированием. При термометрировании используют в зависимости от температуры нагрева детали хромель-алюмелевые или хромель-копелевые термопары с диаметром электродов порядка 0,2 мм, которые устанавливаются по определенной схеме в нагреваемом слое материала детали. Непосредственный замер температуры нагрева можно, например, осуществлять с помощью электронного потенциометра. Поскольку в зависимости от размеров детали процесс термопластического упрочнения может осуществляться по односторонней или двухсторонней схеме охлаждения, то расположение термопар также подчиняется этой закономерности. При заданной толщине нагрева термопары располагаются с определенным шагом так, чтобы контролировать всю глубину прогрева. За время прогрева детали принимается то значение, по истечении которого весь комплект установленных по глубине термопар уверенно фиксирует одинаковую заданную температуру. Разброс показаний не должен превышать 5-10 °С.

Расчеты и экспериментальные исследования показали, что в результате нагрева, например, детали типа пластины (лопатки ком-

прессора или турбины) температура по всему сечению термоупрочняемого пера должна быть постоянной и равной температуре нагрева при ТПУ. Если объектом упрочнения является элемент крупногабаритной детали типа диска компрессора или турбины, то достаточно реализовать его односторонний прогрев на такую глубину, которая в зависимости от теплофизических свойств материала обеспечит в последующем гарантированное формирование сжимающих остаточных напряжений. На рис. 2 в качестве примера показана схема расположения термопар при термометрировании межпазового выступа диска турбины.

В данном случае расположение термопар непосредственным образом связано с тем, что при термоупрочнении указанного элемента реализуется схема одностороннего охлаждения, в соответствии с которой передний торец, боковые стороны (“елка”) и верхняя часть выступа равномерно прогревались на определенную глубину до соответствующей температуры. Расположение контрольных точек для замера температурных полей выглядит следующим образом: термопары 1, 2 и 3 расположены на верхней стороне выступа в отверстиях глубиной 4 мм, а термопары 4 и 5 - на его боковых поверхностях. Указанное расположение также обусловлено тем, что при нагреве, а он осуществлялся с применением газовой горелки, необходимо, чтобы пламя равномерно омывало все поверхности

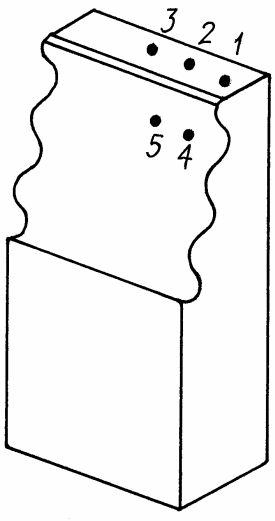


Рис. 2. Образец для исследования температурных полей

выступа, постепенно прогревая его объем.

Как было отмечено ранее, вторым этапом процесса термопластического упрочнения является ускоренное охлаждение поверхностей нагретой детали.

Анализ литературных источников [3] и практический опыт исследования процесса ТПУ [4] показал, что интенсивность охлаждения, показателем которой является коэффициент теплоотдачи, существенно влияет на возможность и величину формируемых остаточных напряжений. Установлено, что эффективным и достаточно простым в реализации является способ спрейерного (душевого) охлаждения водой. В отличие от большинства других методов он обладает большей интенсивностью процессов теплообмена между охлаждаемой поверхностью детали и охлаждающей средой, что обеспечивает создание в поверхностном слое детали значительных по величине сжимающих остаточных напряжений.

Величина коэффициента теплоотдачи зависит от таких факторов как теплофизические свойства материала, давление охлаждающей жидкости, размеры отверстий в решетках охлаждения и т.д. При нахождении зависимости коэффициента от температуры охлаждаемой поверхности, что требуется при теоретическом расчете параметров напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя, необходимо за основу брать температурное поле, полученное расчетным или экспериментальным путем при соответствующих условиях и режимах охлаждения детали.

Экспериментальное определение температурного поля можно осуществить или путем термометрирования натурной детали, как это показано на рис. 2, или с применением специального калориметра, схема которого представлена на рис. 3. Поскольку процесс охлаждения при термопластическом упрочнении характеризуется высокими значениями скоростей теплоотдачи, то для регистрации термотока необходимо применять быстро записывающую аппаратуру со скоростью записи не менее 0,5 м/с. В этом качестве можно применить светолучевой осциллограф. После расшифровки термограмм строятся графики изменения температуры в процессе охлаждения от времени для различных точек детали (образца). В качестве примера на рис. 4 пред-

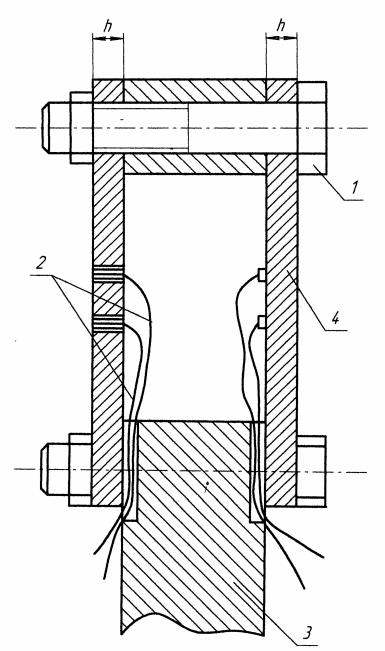


Рис. 3. Калориметр для определения температурного поля:
1 – болт; 2 – термопара; 3 – оправа; 4 – образец

ставлена зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры охлаждаемой поверхности для титанового сплава ВТ9, которая была рассчитана для соответствующего температурного поля. Давление охлаждающей жидкости через отверстия спрейера составило Р=0,58-0,6 МПа.

Большой объем теоретических и экспериментальных исследований показал, что толщина детали и теплофизические характеристики ее материала влияют на возможность создания в поверхностном слое остаточных напряжений. В подтверждение этого можно привести результаты исследования остаточных напряжений в пере лопатки компрессора из титанового сплава ВТ9 (рис.5).

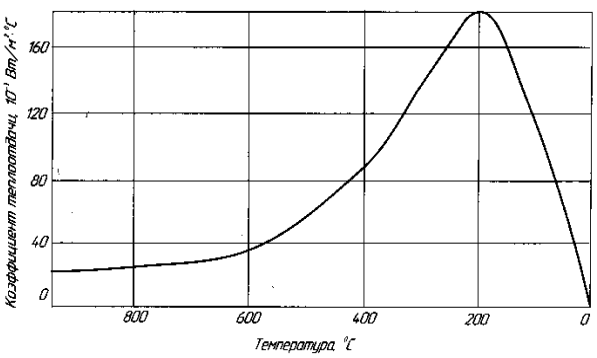


Рис. 4. Изменение коэффициента теплоотдачи от температуры охлаждаемой поверхности для титанового сплава ВТ9

Видно, что в образцах толщиной 1,96 мм возникают сжимающие остаточные напряжения с максимальной величиной до 660 МПа на поверхности, а глубина проникновения напряжений превышает 150 мкм. Причем, более толстые образцы имеют большие максимальные напряжения и глубины залегания. В образцах с толщиной 1,47 мм в поверхностном слое часто наблюдаются растягивающие напряжения, максимальная величина которых изменяется в пределах 250-350 МПа. Таким образом, для титановых сплавов толщина упрочняемой детали не должна быть менее 1,8-2,0 мм.

Аналогичные исследования, проведенные на жаропрочных хромоникелевых сплавах ХН77ТЮР ХН70МВТЮБ и других, показали, что минимальная толщина упрочняемой детали для них оставляет 1,0-1,2 мм. Объясняется это тем, что указанные сплавы на основе железа имеют более высокие теплофизические характеристики, чем титановые сплавы.

Выявленные закономерности особенно важны для таких высоконагруженных деталей, как лопатки турбины и компрессора. Проблема заключается в том, что тонкие кромки лопатки, имеющие толщины 0,5 мм и менее, в процессе эксплуатации подвержены значительным нагрузкам. Следствием этого является тот факт, что лопатки, как правило, разрушаются по кромкам. Следовательно, создание в поверхностном слое тонкой кромки благоприятных сжимающих остаточных напряжений будет, несомненно, способствовать увеличению работоспособности всей лопатки. Исследования показали, что данную проблему можно решить путем присоединения к тонким участкам лопатки специальной дополнительной массы.

Результаты применения приспособления со специальной дополнительной массой при термопластическом упрочнении, показали, что по всему перу лопатки, включая тонкие кромки, формируются только сжимающие остаточные напряжения соответствующей величины и глубины распространения.

Таким образом, использование специальных дополнительных масс, нивелирующих влияние масштабного фактора, дает возможность при термопластическом упрочне-

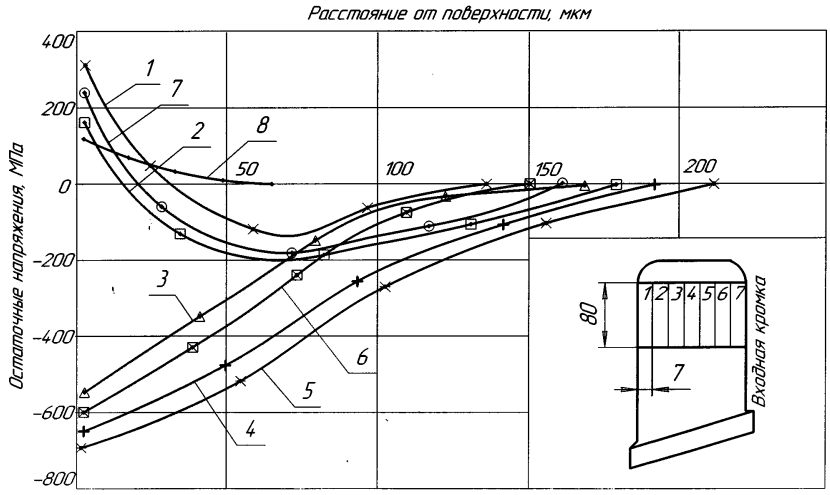


Рис. 5. Остаточные напряжения в образцах из пера лопатки компрессора
Режим ТПУ: Т=900^{0}С; Р=0,60 МПа
1 – =0,96 мм; 2 – =1,47 мм; 3 – =1,96 мм; 4 – =2,27 мм; 5 – =2,29 мм; 6 – =1,98 мм; 7 – =1,29 мм; 8 – без ТПУ

нии создать более равномерное поле сжимающих остаточных напряжений по всему перу лопатки с любой сложной геометрической формой.

Метод ТПУ является одним из высоко эффективных технологических методов упрочняющей обработки, с помощью которого возможно достижение необходимого уровня предела выносливости детали благодаря созданию в ее поверхностном слое благоприятного напряженного состояния в виде сжимающих остаточных напряжений при минимальной степени наклепа.

Возможность повышение сопротивления усталости деталей, работающих в условиях повышенных температур и знакопеременных нагрузок, методом термопластического упрочнения можно проиллюстрировать на примере лопаток компрессора ГТД.

Испытания на усталость проводились на стандартных плоских образцах из титанового сплава ВТ9. Образцы прошли полный цикл технологической обработки, характерный для изготовления лопаток компрессора.

Для приближения условий испытания к реальным условиям эксплуатации образцы проверялись при максимальной рабочей температуре (400 ^{o}С). Так как все исследования образцов выполнялись применительно к компрессорным лопаткам, которые в процессе работы подвержены переменным нагрузкам, за основу был взят асимметричный цикл нагружения с величиной асимметрии =150 МПа. При определении предела ограниченной выносливости для сравнительных испытаний была принята база =5·10^6 циклов.

Результаты исследования сопротивления усталости показали, что предел ограниченной выносливости образцов из сплава ВТ9, упрочненных термопластическим методом, равен =340 МПа, что на 42% выше, чем у образцов, не прошедших термопластического упрочнения (=240 МПа). Решающую роль в этом сыграли сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое с максимумом на поверхности. Необходимо также отметить, что с увеличением базы испытания относительный прирост предела выносливости растет, то есть наблюдается эффект “самоупрочнения”. Немалую роль в этом сыграла малая степень релаксации остаточных напряжений, созданных при ТПУ, что способствовало увеличению времени до момента зарождения усталостной микротрещины.

Представленные результаты исследования процесса термопластического упрочнения свидетельствуют о том, что данный метод целесообразно применять для повышения сопротивления усталости материала деталей, работающих в условиях повышенных температур и переменных нагрузок. Показано, что эффективность процесса ТПУ зависит от его технологических параметров и конструктивных особенностей реализации. Целенаправленно управляя ими, можно существенным образов повысить долговечность работы высоконагруженных деталей ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безъязычный В.Ф.* Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 2001. №4.
2. Технологические методы повышения надежности деталей машин: Справочник / *Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков.* М.: Машиностроение, 1993.
3. *Подзей А.В., Серебренников Г.З.* Регулирование остаточных напряжений сквозным нагревом деталей с последующим быстрым охлаждением //Тр. МАИ. 1961. Вып. 140.
4. *Вишняков М.А.* Повышение эксплуатационных характеристик крупногабаритных деталей ГТД. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2003.

CONSTRUCTIVE - TECHNOLOGICAL FEATURES OF APPLICATION OF A METHOD OF THERMOPLASTIC HARDENING FOR INCREASE OF RESISTANCE OF WEARINESS OF DETAILS GTE

© 2007 M.A.Vishnjakov, I.S. Starchevoj

Samara State Aerospace University

In clause the basic are considered technological and the efficiency factors influencing efficiency of application of a method of thermoplastic hardening for creation of a favorable intense condition in a superficial layer of details GTE with the purpose of increase of their resistance of weariness/