

УДК 621.438:621.822

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ СРЕДСТВАМИ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2014 А.С. Букатый

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 21.11.2014

Рассмотрено применение статического и динамического моделирования с целью оптимизации режимов упрочняющей обработки, позволяющего учесть фактор времени при анализе НДС и расчёте технологических остаточных деформаций ответственных деталей двигателей.

Ключевые слова: *лопатка, компрессор, дробеструйная обработка, выглаживание шариком, обкатка роликом, пластическая деформация, динамическое моделирование*

Производство газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок неразрывно связано с применением упрочняющих технологий. Упрочняющей обработке подвергаются наиболее ответственные детали, к которым предъявляются высокие требования по геометрической точности и сопротивлению усталости. Одними из наиболее распространенных методов упрочняющей обработки являются методы поверхностного пластического деформирования (ППД), такие, как гидродробеструйная обработка, пневмодробеструйная обработка, обкатка роликом или шариком. Процесс упрочнения представляет собой создание наклепанного поверхностного слоя детали, в котором создаются сжимающие остаточные напряжения (ОН), препятствующие развитию микродефектов.

В ряде случаев при проведении прочностных расчётов, а также для предварительной оценки технологических остаточных деформаций деталей ГТД необходимо создавать модель детали, учитывающей эффект упрочнения. С этой целью создана методика, позволяющая моделировать напряжённо-деформированное состояние (НДС) поверхностного слоя деталей, подвергнутых упрочнению методами ППД, что особенно актуально при типовом анализе НДС концентраторов напряжений дисков, лопаток ГТД, а также при оптимизации режимов упрочняющей обработки. В перечень деталей, подвергаемых упрочняющей обработке и подверженных короблению, входят лопатки ГТД, диски компрессора и турбины, кронштейны и др. Наиболее характерные дефекты, встречающиеся на производстве – изменение геометрических размеров и формы деталей: изменение радиусов упрочняемых отверстий, изгиб и закрутка лопаток, изгиб полотна дисков, фланцев и проушин.

Исследованию технологических остаточных деформаций (ТОД) и оптимизации режимов

упрочняющей обработки посвящён ряд работ. Большой интерес в данной области представляют работы [1-3], в которых большое внимание уделено основным технологическим параметрам упрочняющей обработки и повышению сопротивления усталости упрочняемых деталей. В работах [4, 5] разработаны аналитические основы прогнозирования остаточных деформаций деталей произвольной формы по остаточным напряжениям и показано применение разработанных методов в производственных условиях. Работа [6] посвящена обеспечению геометрической точности изготовления лопаток ГТД с применением подходов, основанных на методе конечных элементов в пакете ANSYS. В данной работе изложены основы моделирования ОН в тонком поверхностном слое и расчётного прогнозирования ТОД с применением программных пакетов конечно-элементного анализа.

Появление универсального роботизированного упрочняющего оборудования позволяет решать проблемы коробления деталей на принципиально новом уровне путём назначения дифференцированных режимов упрочнения для зон концентрации напряжений и остальной поверхности детали, в результате чего процесс упрочнения программируется с учётом наиболее значимых параметров, таких, как точность геометрических размеров и формы детали, сопротивление усталости. В связи с этим необходимы новые подходы к назначению режимов упрочнения, учитывающие точную геометрию детали и использующие возможности современного упрочняющего оборудования, наиболее совершенные методы контроля остаточных напряжений и современные программные пакеты конечно-элементного анализа, такие, как ANSYS, Nastran и другие.

Статическое моделирование. Исследование упрочняющей обработки с применением метода конечных элементов в статике позволяет моделировать НДС поверхностного слоя деталей, подвергнутых упрочнению методами ППД, что особенно актуально при типовом анализе НДС

Букатый Алексей Станиславович, кандидат технических наук, докторант кафедры сопротивления материалов. E-mail: bukaty@inbox.ru

концентраторов напряжений дисков, лопаток ГТД, а также для оптимизации режимов упрочняющей обработки. Моделирование упрочняющей обработки осуществлялось в пакете ANSYS. Основными параметрами при создании конечно-элементной модели являются глубина залегания ОН и распределение ОН по толщине поверхностного слоя. Указанные параметры получают экспериментально с помощью электрохимического травления опытных образцов [7]. Конечно-элементная модель детали представляет собой два объёма, один из которых – поверхностный слой в виде оболочки заданной толщины, второй объём – остальная часть детали. При этом свойства материала поверхностного слоя при необходимости также могут быть изменены относительно основного объёма детали. В случае необходимости загрузки различных напряжений в определённые области детали следует выделять эти области как отдельные объёмы детали, размечаемые элементами, поддерживающими соответствующие функции. В зависимости от поставленной задачи можно загружать как постоянный уровень напряжений по толщине выделенного объёма, так и переменный.

Типы элементов и способ моделирования выбираются в зависимости от толщины выделенных объёмов и особенностей решаемой задачи. Например, при моделировании упрочняемого поверхностного слоя толщиной 0,2 мм, в который необходимо загрузить переменную по толщине эпюру остаточных напряжений, целесообразно поверхностный слой выделить одним объёмом, размеченным элементами SOLID-SHELL 190. По толщине поверхностного слоя достаточно одного многослойного элемента, в который будут загру-

жены требуемые напряжения. Аналогичным образом, в случае загрузки напряжений, постоянных по толщине, наиболее оптимально осуществить загрузку ОН в материал выделенного объёма. При этом свойства материала указываются в зависимости от специфики решаемой задачи. В более простом случае, когда изменение свойств поверхностного слоя после упрочнения не влияет на решение поставленной задачи – создаём копию материала детали.

Загрузка ОН осуществляется с помощью команды INISTATE. Команда задаёт совокупность значений загружаемых напряжений $S_x, S_y, S_z, S_{xy}, S_{yz}, S_{xz}$. INISTATE применима только в подразделе Solution. Команда осуществляет загрузку начальных напряжений при выполнении структурного анализа ANSYS. Загрузка осуществляется в текущую выборку элементов и поддерживается большой номенклатурой типов элементов, имеющихся в библиотеке ANSYS. Особое внимание необходимо уделять применяемым системам координат. Начальные напряжения должны быть загружены в локальной системе координат элемента. Если для элемента определена иная система координат, то для её изменения необходимо использовать команду ESYS. После загрузки напряжений их значения доступны для просмотра или удаления для любого элемента или группы элементов с помощью команды INISTATE, LIST. Загрузка напряжений возможна с помощью командной строки, а также используя текстовый ASCII файл. Примером моделирования НДС деталей ГТД с учётом ОН может служить расчёт лопатки компрессора, подвергаемой упрочнению дробеструйной обработкой (рис. 1).

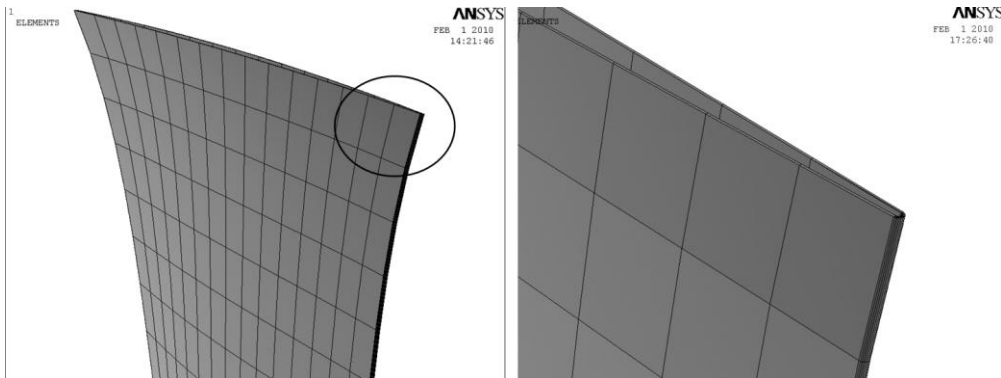


Рис. 1. Конечно-элементная модель упрочнённого поверхностного слоя лопатки ГТД

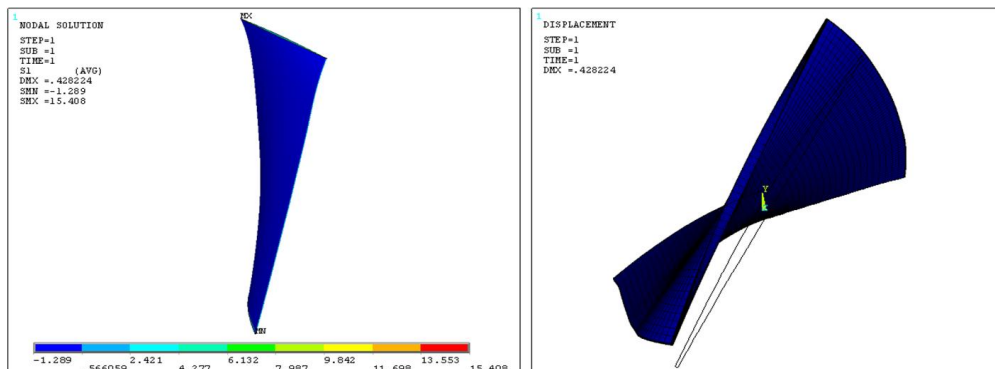


Рис. 2. Деформации лопатки ГТД после упрочнения ППД

Упрочнённый поверхностный слой создан в виде отдельного объема и размечен элементами Solid-shell-190. В поверхностный слой загружена эпюра остаточных напряжений, соответствующая выбранному режиму упрочняющей обработки. В результате расчётов получены ТОД лопатки – изгиб и увеличение угла закрутки (рис. 2).

Модель применима для анализа технологических остаточных деформаций лопатки, а также для анализа НДС корневого сечения пера лопатки под воздействием рабочих нагрузок с учётом повышения сопротивления усталости за счёт упрочнения дробеструйной обработкой. Особенностью расчёта является загрузка напряжений в локальной системе координат элементов поверхностного слоя по осям x и y , при этом ось z элементов направлена по нормали к поверхности лопатки и напряжения по оси z не загружаются ввиду малой толщины поверхностного слоя. Аналогичные модели были созданы для дисков, лопаток, замковых соединений лопатка-диск, подвергаемых упрочнению дробеструйной обработкой, а также для особо ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания, таких, как коленчатый вал и шатун. Применение данного подхода позволяет повысить точность конечно-элементных расчётов и приблизить получаемые результаты к результатам натуральных испытаний.

Для повышения точности аналитических и конечно-элементных расчётов разработан энергетический метод определения режимов упрочнения [8], в основе которого лежит энергия поверхностного пластически деформированного слоя деталей. В результате в качестве начальных напряжений в расчётах используются эквивалентные начальные напряжения, постоянные по толщине поверхностного слоя. Апробация разработанного метода осуществлялась, как на образцах прямоугольной и кольцевой формы, так и на натуральных деталях – дисках и лопатках ГТД. При этом загрузка средней по толщине поверхностного слоя эпюры эквивалентных начальных напряжений показывает в расчётах большую точность, в соответствии с экспериментальными данными, чем послойная загрузка точной эпюры начальных напряжений.

Динамическое моделирование. Исследование и оптимизация упрочняющей обработки и процессов, протекающих в поверхностном слое деталей при ППД, осложнено рядом факторов, не учитываемых в аналитических расчётах остаточных деформаций и при моделировании ТОД в статике. Фактор времени является наиболее значимым. Разработанные ранее подходы рассматривают перераспределение напряжений в виде параметров, изменяющих своё значение при ППД – это выделяемое количество теплоты, изменение энергетического состояния поверхностного слоя и др. Однако процесс пластического деформирования материала и изменение вышеуказанных параметров происходит во времени. Поэтому исследование процесса перераспределения остаточных напряжений и образование остаточных деформаций в зависимости от времени является актуальной задачей.

Исследование упрочняющей обработки с учётом временного фактора осуществляется в пакете ANSYS LS-Dyna. Формирование поверхностного слоя, упрочнённого ППД, в отличие от статического моделирования, производится с помощью моделирования реального воздействия элементов упрочняющей установки на материал модели. В зависимости от применяемого способа упрочнения создаются модели тел в виде роликов или шариков, материал которых условно принимается абсолютно жёстким. Модель детали создаётся из сплошного материала без дополнительного выделения поверхностного слоя. Упрочняющая обработка в LS-Dyna представляет собой реальное перемещение упрочняющих тел во времени относительно упрочняемой детали. Траектория движения упрочняющих тел воспроизводит режим работы упрочняющей установки. Глубина наклёпа, ТОД и распределение ОН являются результатами расчётов. Отличительной особенностью данного подхода является получение ОН в поверхностном слое модели расчётным способом без предварительного определения ОН.

Дальнейшее уточнение расчётов и повышение сходимости осуществляется путём определения ОН в упрочнённых образцах по методике [8]. Применение подходов и оборудования [7, 8] позволяет отладить сходимость процесса динамического моделирования с помощью образцов, изготовленных из материала детали. Далее отлаженная модель процесса динамического моделирования упрочняющей обработки в LS-Dyna реализуется на модели натурной детали. Применение данного подхода особо актуально при отладке технологического процесса изготовления ответственных дорогостоящих деталей, таких, как диски и валы ГТД, коленчатые валы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и др.

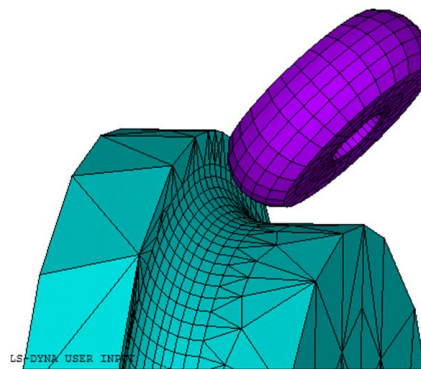


Рис. 3. Модель упрочнения галтелей коленчатого вала обкаткой роликом

Примером применения данного подхода является моделирование процесса упрочнения галтелей коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238. Деталь подвергается упрочнению обкаткой роликом. Моделирование обработки производилось в ANSYS LS-Dyna. Упрочнению подвергались коренные и шатунные шейки. Модель процесса упрочнения (рис. 3) представляет собой галтель

шейки коленчатого вала, подвергаемую упрочнению обкаткой роликом. В результате расчётов получено распределение ОН в поверхностном слое галтели и ТОД коленчатого вала. Результаты моделирования процесса упрочнения в динамике позволяют учесть эффект упрочнения в прочностных расчётах, использующих стандартные граничные условия.

Изложенный подход универсален, применим к различным технологическим процессам и помимо упрочнения позволяет исследовать прочие технологические процессы, связанные с образованием ОН и ТОД, такие как резание, шлифование и др.

Выводы:

1. Изложенные подходы позволяют производить полный цикл исследований остаточных напряжений и остаточных деформаций деталей: оптимизацию технологических процессов упрочняющей обработки с целью обеспечения необходимого сопротивления усталости и ТОД деталей в пределах технологического допуска.

2. Динамическое моделирование упрочняющей обработки позволяет исследовать эффект упрочнения с учётом динамических процессов, таких, как соударение лопаток ГТД с посторонними телами, попадающими в проточную часть двигателя, анализ НДС поршневой группы ДВС в рабочем цикле.

3. Применение динамического моделирования особо актуально при анализе НДС и оптимизации технологического процесса изготовления ответственных дорогостоящих деталей.

4. Разработанные подходы реализованы на роботизированном упрочняющем оборудовании на ответственных деталях ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кузнецов, Н.Д. Пневмодробеструйное упрочнение / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков // Справочник. Инженерный журнал. 2002. № 6. С. 14-19.
2. Цейтлин, В.И. Пневмодробеструйное упрочнение / В.И. Цейтлин, В.И. Волков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 7. С. 13-19.
3. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям: монография / В.Ф. Павлов, В.А. Куртичев, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
4. Овсеенко, А.Н. Технологические остаточные деформации и методы их снижения // Вестник машиностроения. 1991. № 2. С. 58-61.
5. Букатый, С.А. Коробление и размерная стабильность маложёстких тонкостенных деталей в производстве газотурбинных двигателей / С.А. Букатый, И.В. Семенченко // Вестник машиностроения. 1994. № 10. С. 32-37.
6. Смирнов, Г.В. Совершенствование технологии окончательной электрохимической размерной обработки лопаток ГТД с учётом технологической наследственности: монография. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2004. 112 с.
7. Букатый, С.А. Автоматизированная система определения остаточных напряжений / С.А. Букатый, А.С. Букатый // Механика и процессы управления. Труды XXXVIII Уральского семинара. Том 1. – Екатеринбург: УрО РАН, Миасс, 2008. С. 191-194.
8. Букатый, С.А. Энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД поверхностным пластическим деформированием / С.А. Букатый, А.С. Букатый // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. №10(67). С. 45-49.

IMPROVING THE ACCURACY OF MANUFACTURING THE ENGINES CRITICAL PARTS BY MEANS OF STATIC AND DYNAMIC MODELING

© 2014 A.S. Bukatiy

Samara State Aerospace University

The application of static and dynamic simulation for optimization of the hardening treatment is considered. The modeling of hardening allows taking into account the time factor in the analysis of stress-strain state and in the calculation process of the residual deformations of the engines critical parts.

Key words: *compressor, blade, shot peening, roll bolling, plastic deformation, dynamic modeling*