

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ЯМЗ-238 С УЧЁТОМ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

© 2013 А. С. Букатый, В. Э. Костичев, Е. А. Денискина

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье изложен подход к исследованию напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 в концентраторах напряжений, подвергаемых упрочняющей обработке обкаткой роликами. В основе подхода лежит динамическое моделирование напряжённо-деформированного состояния галтелей коренных и шатунных шеек. Моделирование обкатки роликами в реальном времени позволяет получить расчётную эпюру остаточных напряжений, залегающих в упрочнённом поверхностном слое, после чего проводится анализ напряжённо-деформированного состояния детали с применением граничных условий, соответствующих рабочим условиям детали в двигателе. Применение динамического метода к исследованию напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала позволяет произвести анализ технологии изготовления коленчатого вала и выявить очаги зарождения трещин в концентраторах напряжений с учётом повышения сопротивления усталости от упрочняющей обработки.

Поверхностное упрочнение, пластические деформации, остаточные напряжения, концентратор напряжений, динамическое моделирование.

Надёжность и долговечность деталей машин являются одними из основных факторов, определяющих ресурс двигателя. Обеспечение указанных показателей осуществляется путём применения различных способов упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД) и химико-термической обработкой (ХТО) деталей. Упрочняющая обработка позволяет значительно повысить предел выносливости деталей. Однако различные способы упрочнения обладают рядом особенностей, исследование которых немаловажно при разработке технологических процессов и оптимизации конструкции ответственных деталей. Важным фактором является также наличие высоких технологических остаточных деформаций (ТОД) вследствие применения ХТО и упрочнения методами ППД, которые часто превышают установленные технологические допуски. В связи с этим актуальной задачей является разработка метода исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) деталей, позволяющего учитывать влияние сжимающих остаточных напряжений (ОН) в поверх-

ностном слое на сопротивление усталости [1-5] и ТОД деталей [6], а также проводить анализ НДС в рабочих условиях с учётом вышеуказанных эффектов.

В основе разрабатываемого метода лежит динамическое моделирование НДС деталей. В соответствии с внешними воздействиями к модели детали налагаются граничные условия в реальном времени. В качестве граничных условий моделируются процессы, протекающие в материале детали при упрочняющей обработке методами ППД на различных режимах. Дальнейшие расчёты заключаются в приложении по времени рабочих нагрузок, соответствующих условиям работы детали в двигателе. Получаемое в результате расчётов НДС наиболее приближено к реальным рабочим условиям и позволяет производить оптимизацию режимов упрочняющей обработки и оптимизацию конструкции деталей с целью повышения их сопротивления усталости, а также выявить очаги развития микродефектов, приводящих к разрушению детали.

Апробация разработанного метода производилась на деталях поршневого

двигателя внутреннего сгорания. Коленчатый вал двигателя ЯМЗ-238 является ответственной деталью, определяющей ресурс двигателя. Условия его работы отличаются наличием высоких знакопеременных нагрузок, воздействие которых приводит к разрушению детали. Анализ изломов коленчатых валов дизельных двигателей показал, что разрушение вызвано появлением и развитием усталостных трещин в наиболее напряжённых местах вала – галтелях коренных и шатунных шеек (рис. 1).

Подобная закономерность трещинообразования свидетельствует о высоком уровне рабочих напряжений и наличии их концентрации в наиболее нагруженных зонах деталей. Для повышения сопротивления усталости коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 применяется обкатка галтелей роликами. Особенностью этого метода упрочнения является большая глубина наклёпанного поверхностного слоя и узкая локализация сжимающих остаточных напряжений в галтели [7, 8]. Обкатка роликом обеспечивает значительное повышение предела выносливости, но при этом необходимо проводить дополнительные исследования, так как образующиеся в поверхностном слое ОН снижают геометрическую точность детали. Кроме того, анализ отказов детали при испытаниях свидетельствует о росте усталостных трещин в зоне границы между упрочнённым и неупрочнённым материалом детали.



Рис. 1. Галтель шейки коленчатого вала

Изучение указанных вопросов приводит к необходимости моделирования упрочняющей обработки и НДС очагов зарождения дефектов в галтелях коренных и шатунных шеек посредством динамического метода исследования деталей двигателя с учётом рабочих условий.

Моделирование коленчатого вала производилось в системе конечно-элементного анализа ANSYS/LS-DYNA. Конечно-элементная модель для исследования НДС с учётом рабочих нагрузок представляет фрагмент поршневой группы двигателя ЯМЗ-238 (рис. 2).

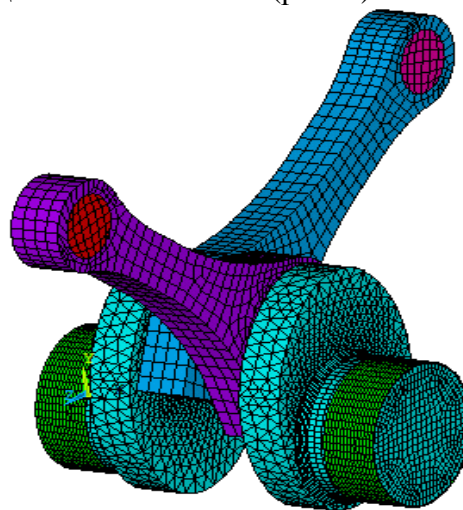


Рис. 2. Конечно-элементная модель коленчатого вала

Анализ состоял из двух частей, составляющих один расчёт. Первоочередным являлось получение НДС коленчатого вала и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое материала детали после воздействия роликами при обкатке галтелей. Дальнейшие расчёты были направлены на моделирование НДС концентраторов напряжений коленчатого вала от воздействия рабочих нагрузок с учётом повышения сопротивления усталости от упрочняющей обработки.

На первом шаге моделировалось воздействие роликов на коренные и шатунные шейки при обкатке (рис. 3). Условия обкатки и материал роликов соответствовали применяемому на практике режимам.

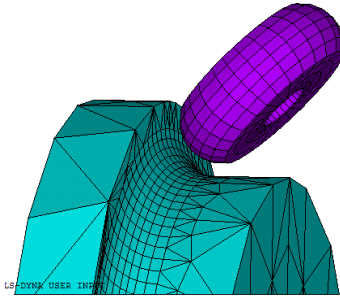


Рис. 3. Динамическая модель обкатки роликами коленчатого вала

В результате моделирования процесса обкатки роликами была получена расчётная эпюра остаточных напряжений $S_{ост}$ по толщине поверхностного слоя галтели коленчатого вала (рис. 4). Полученное НДС коленчатого вала является исходным для дальнейшего анализа. Последующие расчёты заключались в создании моделей двух шатунов, оказывающих воздействие на шатунную шейку. К шатунам прикладывались динамические нагрузки, соответствующие рабочим условиям деталей двигателя.



Рис. 4. Расчётная эпюра ОН в галтелях коленчатого вала после обкатки роликами

Давление газа в камере сгорания определялось зависимостью от времени усилия, передаваемого на шатунную шейку через шатун. Вращение модели коленчатого вала осуществлялось с учётом трения в подшипниках скольжения. В результате расчётов было получено НДС коленчатого вала от воздействия рабочих нагрузок с учётом остаточных напряжений (рис. 5).

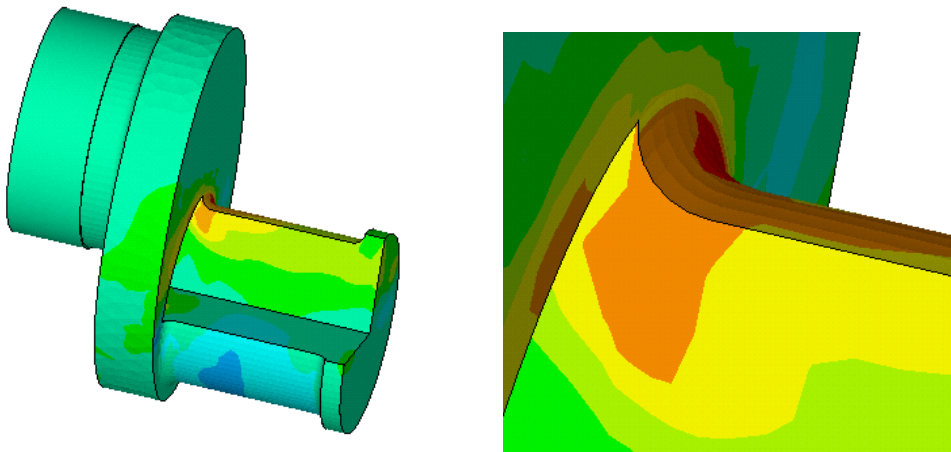


Рис. 5. НДС коленчатого вала при воздействии рабочих нагрузок с учётом ОН

Сравнение данных металлографического анализа (рис. 6) показало взаимосвязь результатов расчётов с экспериментальными исследованиями по анализу зон зарождения микротрещин, являющихся причиной разрушений.

Разработанная расчётная модель позволяет определить участки concentra-

ции напряжений и соответствующие им очаги зарождения усталостных трещин, а также сделать вывод о рациональности применяемых способов и режимов упрочняющей обработки. Расчётная эпюра сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое галтелей необходима для разработки меропри-

ятий по снижению концентрации растягивающих напряжений от рабочих нагрузок на поверхности галтелей, а также определения величины растягивающих ОН, расположенных под наклёпанным слоем. При этом становится возможной оценка отклонений геометрических размеров и формы детали от требований конструкторской документации. Изложенный в ис-

следованиях подход даёт возможность осуществить предварительную оценку остаточных напряжений и напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала с учётом упрочняющей обработки. Более достоверные данные о распределении остаточных напряжений в галтелях коленчатого вала можно получить экспериментальным методом [9].

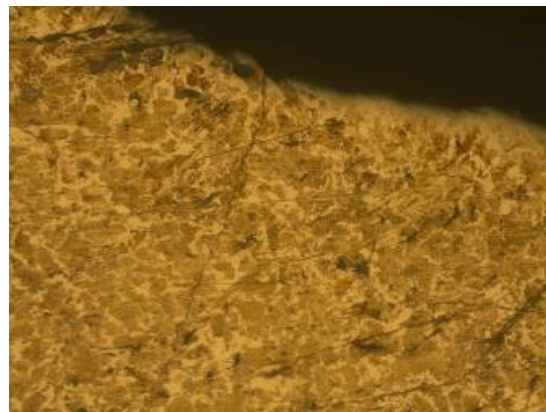


Рис. 6. Металлографический анализ развития дефекта в галтели шейки коленчатого вала

Таким образом, разработанный динамический метод исследования напряжённо-деформированного состояния концентраторов напряжений в деталях двигателей внутреннего сгорания позволяет:

– учитывать повышение сопротивления усталости за счёт упрочняющей обработки при анализе НДС деталей под воздействием рабочих нагрузок;

– осуществлять выбор способа упрочнения и оптимизацию режимов упрочняющей обработки по допускаемым технологическим остаточным деформациям;

– уточнять локализацию зарождения дефектов в концентраторах напряжений с учётом упрочнённого поверхностного слоя и разрабатывать конструкторские и технологические мероприятия, направленные на повышение сопротивления усталости деталей.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

2. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.

3. Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести [Текст] / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестн. СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. – 2009. – №2 (19). – С. 264-268.

4. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно

упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

5. Вакулюк, В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.С. Вакулюк // Вестн. СГАУ. – 2012. – №3(34). – С. 172-176.

6. Букатый, А.С. Обеспечение точности изготовления деталей после упрочнения поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.С. Букатый // Проблемы исследования и проектирования машин: сб. статей IV Междунар. науч.-техн. конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2008. – С. 24-26.

7. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям [Текст] / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк [и др.] – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 124 с.

8. Вакулюк, В.С. Закономерности распределения остаточных напряжений при упрочнении малых по протяжённости зон цилиндрических деталей [Текст] / В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестн. СамГТУ. Сер. Технич. науки. – 2010. – №2(26). – С. 125-130.

9. Букатый, С.А. Автоматизированная система определения остаточных напряжений в образцах сложной формы [Текст] / С.А. Букатый, А.С. Букатый. – Вестн. СГАУ. – 2006. – № 2(10). Ч. 2. – С. 307-310.

DYNAMIC METHOD OF INVESTIGATING STRESS CONCENTRATORS OF THE YMZ-238 ENGINE CRANKSHAFT CONSIDERING SURFACE HARDENING PLASTIC DEFORMATION

© 2013 A. S. Bukaty, V. E. Kostichev, E. A. Deniskina

Samara State Aerospace University

The article presents an approach to analyzing the stress-strain state of the YMZ-238 crankshaft after surface roller hardening. The approach is based on dynamic modeling of the stress-strain state of the crankshaft stress concentrators. The real-time modeling of roller hardening makes it possible to get a diagram of residual stresses occurring in the strengthened surface layer of the fillets. The next step is the analysis of the part's stress-strain state applying the boundary conditions corresponding to the operating conditions of the engine. The dynamic research of the stress-strain state of the crankshaft makes it possible to analyze the manufacturing technology and identify the origin of cracks in stress concentrators taking into account the improvement of fatigue resistance resulting from hardening treatment.

Surface hardening, plastic strain, residual stress, stress concentrator, dynamic modeling.

Информация об авторах

Букатый Алексей Станиславович, кандидат технических наук, докторант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: bukaty@inbox.ru. Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, повышение сопротивления усталости ответственных деталей тепловых двигателей, упрочняющие и антикоррозионные покрытия, прогнозирование сопротивления усталости.

Костичев Владислав Эдуардович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: hourvald@mail.ru. Область научных интересов: конечно-элементное моделирование, остаточные напря-

жения и деформации, повышение сопротивления усталости ответственных деталей тепловых двигателей.

Денискина Екатерина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Bukatyi Alexey Stanislavovich, Candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer, Machining Technology Department, Samara State Aerospace University. E-mail: bukaty@inbox.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Kostichev Vladislav Eduardovich, post-graduate student, Strength of Materials Department, Samara State Aerospace University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Deniskina Ekaterina Alexandrovna, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Higher Mathematics Department, Samara State Aerospace University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.