УДК 535.4 + 621.43

А.П. Марченко, д-р. техн. наук. А.Г.Кесарийский, инж.

ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ РАЗРАБОТКИ ДВС

Создание конкурентоспособных двигателей внутреннего сгорания – одна из важнейших задач двигателестроительных предприятий Украины. Ведущие фирмы развитых стран, выпускающие ДВС, каждые три-четыре года предлагают новые образцы, демонстрируя очень высокие темпы их разработки. Очевидно, что в этих условиях без резкого подъема качества и темпов разработки новой продукции предприятиям Украины весьма сложно занять достойное место в мировом экономическом сообществе. Одним из путей решения этой проблемы является использование высокоэффективных современных средств создания и доводки двигателей.

Опыт динамично развивающихся двигателестроительных предприятий показывает, что применение высоких технологий на стадии разработки двигателей внутреннего сгорания дает шанс создать конкурентоспособную продукцию, востребованную не только на внутреннем, но и зарубежном рынке. В то же время, очевидно, что при ограниченном финансировании НИР, отечественным предприятиям чрезвычайно сложно конкурировать с международными промышленными гигантами. В этих условиях особое значение приобретает применение высоких технологий, обеспечивающих существенный выигрыш в темпах и затратах на разработку ДВС.

Применение в двигателестроении систем автоматизированного проектирования (САПР) на основе CAD/CAM/CAE технологий привело к существенной интенсификации процесса формирования геометрического облика деталей ДВС. Возможности, предоставляемые CAD-модулями по геометрическому моделированию деталей, упростили решение проблем многовариантной трансформации формы детали, компоновки узлов, оценки собираемости и т.д. Использование CAE-модулей для математического моделирования состояний и процессов обеспечило возможность проведения глубокого анализа напряженно-деформированного состояния деталей, а формирование управляющих программ с применением CAM-модулей позволило оперативно изготавливать опытные образцы деталей на станках с ЧПУ.

К сожалению, достоинства такой технологии разработки двигателей, в полной мере проявляются только применительно к геометрически простым деталям, которые и так достаточно хорошо отработаны за период многолетней практики производства ДВС. При разработке же сложных деталей, например, блок-картеров имеющих специфическую геометрическую форму, содержащих элементы прецизионных кинематических пар, подверженных воздействию механических и тепловых нагрузок, применение автоматизированных систем, весьма затруднительно. Проблема состоит в том, что математический анализ напряженно-деформированного состояния геометрически сложной детали требует подробного описания краевых условий, а это достаточно сложно выполнить, опираясь только на теоретические представления конструктора-разработчика о взаимодействии деталей в сборке и влиянии нагрузок на формирование НДС. В результате доводка конструкции по-прежнему проводится путем итерационного приближения к приемлемому результату, а затраты времени и финансовых ресурсов сводят к минимуму эффект от использования автоматизированных систем разработки деталей ДВС. Кроме того, это вынуждает конструктора с осторожностью относиться к созданию нового конструктивного об-

раза сложной детали и минимизировать изменения по отношению к исходному прототипу, что существенно сдерживает темп совершенствования ДВС.

Анализ проблем автоматизированной разработки сложных деталей ДВС, таких как блок-картер, головка, коленчатый вал и т.д., показывает, что существенное уменьшение времени и затрат на разработку этих деталей при одновременном повышении их технических характеристик, может быть достигнуто только при использовании автоматизированного поискового конструирования и математического моделирования, основанных на понимании физической сущности взаимодействия элементов конструкции под воздействием рабочих и технологических нагрузок, а так же на применении достоверных граничных условий при формировании математической модели. Кроме того, конечноэлементные модели применяемые для расчетов должны проходить обязательную верификацию по экспериментальной высокоточной информации представленной в виде интегральных полей деформаций и перемещений. Последнее требование сопряжено с тем, что достоверность столь сложных моделей практически невозможно оценить по единичным, точечным экспериментальным значениям.

Таким образом, для успешной и целенаправленной корректировки геометрических характеристик виртуальной детали и ее конечноэлементной модели должна существовать физическая деталь, пригодная для экспериментального исследования. Фактически это означает, что для создания высококачественной конструкторской документации необходима деталь, изготовленная по этой же документации!

Решение этой проблемы состоит в создании прототипа детали, - первого ее приближения в цепи последующих модификаций. Для простых деталей это не составляет труда, но для блок-картера получение его прототипа традиционными методами сопряжено со столь большими затратами, что экономическая целесообразность такого подхода при современном уровне развития методов и средств исследования и разработки ДВС становится весьма сомнительной. Решение этой задачи может быть эффективно выполнено с применением технологий быстрого прототипирования (Rapid Prototyping) [1].

Фрагмент обобщенной блок-схемы разработки деталей ДВС с применением CAD/CAM/CAE технологий и методов быстрого прототипирования показан на рис.1.

Рис. 1. Фрагмент схемы автоматизированной разработки деталей ДВС

Технологии Rapid Prototyping обеспечивают возможность быстрого изготовления прообразов детали двигателя не только соответствующих геометриче-

ским формам твердотельной CAD-модели, но в ряде случаев позволяют получить функциональную деталь, имеющую характеристики, соответствующие детали, которая будет изготавливаться серийно. Именно эта возможность, как видно из приведенной схемы, позволяет на самых ранних стадиях разработки произвести экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния деталей и узлов ДВС с целью верификации расчетных моделей и целенаправленного улучшения конструктивных и технологических характеристик элементов двигателя. При этом для сохранения темпов и качества разработки, технологии быстрого прототипирования должна соответствовать столь же высокая, информационно насыщенная методология экспериментального анализа напряженно-деформированного состояния деталей, узлов, сборок.

Опыт экспериментального исследования НДС деталей и узлов ДВС показывает, что в наибольшей степени потребностям систем автоматизированной разработки ДВС соответствуют лазерно-интерференционные методы [2-4]. Высокая чувствительность к перемещениям, составляющая доли микрона, интегральный характер регистрации поля перемещений, возможность определения пространственного вектора перемещений при исследовании реальных объектов под воздействием реальных нагрузок – все это обеспечивает высокую информативность исследования и хорошую сочетаемость с расчетными методами.

Последовательность интерферограмм деформирования наружной поверхности блок-картера двигателя ЗМЗ 406.10, полученных по методу двойной экспозиции при последовательном увеличении перепада давления в цилиндре от 0.1 МПа до 3.0МПа показана на рис.2. Даже качественный анализ интерферограмм свидетельствует о чрезвычайной информативности этого метода. Например, можно отметить, что блок-картер имеет пониженную жесткость боковой стенки, проявляющуюся в формировании локальных зон прогиба (кольцевые интерференционные структуры) при нагружении давлением. Величины перемещений могут быть получены для любой точки поверхности или по сечению, например, А-А, как это показано на рис.2.

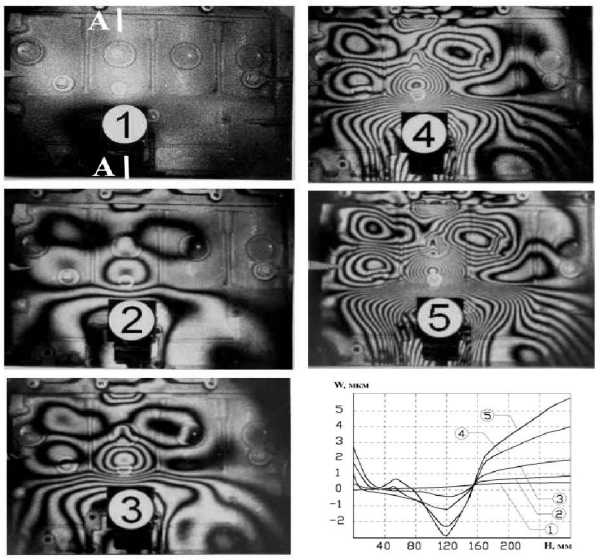

Рис.2. Последовательность интерферограмм деформирования наружной поверхности блока цилиндров ЗМЗ 406.10 при нагружении перепадом давления в цилиндре: 1- 0.1МПа, 1- 0.5 МПа, 1- 1.0МПа, 1- 2.0МПа, 1- 3.0МПа

Комплексное использование CAD/CAM/CAE технологий в сочетании с методами быстрого прототипирования и лазерно-интерференционными измерениями существенно расширяет возможности конструктора при создании новых изделий, позволяет смелее отступать от традиционных решений. Анализ фрагмента схемы процесса разработки деталей ДВС показанной на рис.1., позволяет убедиться в этом на примере разработки блок-картера ДВС.

После формирования исходного геометрического облика детали на этапе поискового конструирования, полученная геометрическая модель передается в модуль CAE, на стадию математического анализа с применением, например, конечноэлементных методов. Конечноэлементная модель, построенная на ос-

новании CAD-модели, предыдущего опыта и первоначальных представлений о функционировании элементов конструкции, позволяет провести анализ НДС в первом приближении и устранить грубые ошибки, аномалии в распределении напряжений и деформаций. Варьируя геометрическими параметрами детали, свойствами материала, связями элементов конструкции и т.д., конструктор последовательно формирует геометрический облик детали, доводя его до приемлемого уровня, соответствующего заданным критериям работоспособности. Полученная уточненная 3-D геометрическая модель передается в комплекс быстрого прототипирования, что в случае изготовления, например, автомобильного блок-картера обеспечивает возможность получения отливки и ее окончательной обработки за 1-2 недели.

Дальнейший процесс разработки заключается в определении лазерно-интерференционными методами реальных деформационных характеристик блок-картера под воздействием рабочих и технологических нагрузок. Как показано в работе [5] для верификации математической модели блок-картера целесообразно провести измерение полей деформации наружной поверхности этой детали при воздействии технологических усилий сборки блока с головкой цилиндров и при воздействии внутрицилиндрового давления. Полученные поля перемещений, с учетом дальнейшего использования математической модели позволяют: определить правильность задания граничных условий в части взаимодействия элементов конструкции; выяснить достаточность количества и оптимизировать число конечных элементов, применяемых при разбиении геометрической модели;

- привести распределение густоты конечноэлементной сетки в соответствие с реальным распределением деформаций и перемещений;
- откорректировать типы конечных элементов применяемых при создании конечноэлементной модели.

Принятые ранее граничные условия корректируют по данным распределения перемещений по полю детали. При этом добиваются подобия расчетного поля перемещений и экспериментально с учетом формы и градиентов поля перемещений, а не только величины перемещений в точках.

Исследование деформационных характеристик блока цилиндров при воздействии затяжки крепежа и нагружении внутренним давлением достаточно полно отражает особенности взаимодействия основных деталей двигателя. Но, в случае разработки блок-картера ДВС со съемными гильзами, целесообразно провести дополнительное исследование деформации зеркала цилиндра при затяжке крепежа. Необходимость такого исследования вызвана наличием дополнительных связей между элементами конструкции, существенно влияющими на формирование общего напряженно-деформированного состояния ДВС.

Дальнейшие операции по оптимизации конструкции блок-картера проводятся с использованием отлаженной конечноэлементной модели и с учетом особенностей формирования напряженно-деформированного состояния конструкции, выявленных при экспериментальном исследовании прототипа блок-картера. Расчетно-экспериментальные исследования блок-картера двигателя ЗМЗ 406.10 подтвердили эфективность предложенной технологии. На рис.3 в качестве примера приведены расчетное и экспериментальное поле деформирования боковой стенки блок-картера этого двигателя при нагружении физической и виртуальной детали одинаковым усилием затяжки.

Хорошая сходимость результатов подтверждает целесообразность применения методов быстрого прототипирования и лазерно-интерференционных методов измерения как элементов современной системы автоматизированной разработки деталей и узлов ДВС.

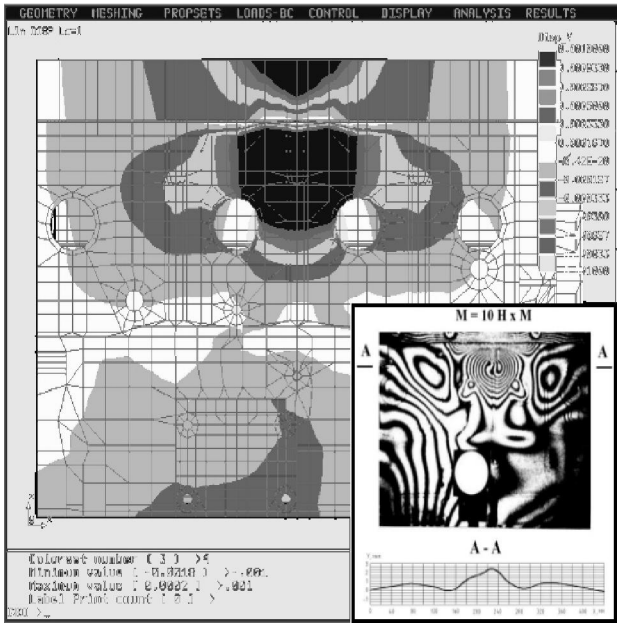

Рис.3. Расчетное и экспериментальное поле нормальных перемещений боковой поверхности ДВС ЗМЗ 406.10 при затяжке резьбового крепежа

Выводы

Комплексное использование методов быстрого прототипирования в сочетании с лазерно-интерференционными методами анализа напряженно-деформированного состояния деталей-прототипов обеспечивает возможность существенного сокращения временных и финансовых затрат при разработке сложных деталей ДВС. Это достигается смещением итерационных процессов разработки и доводки из области исследования и испытания физических деталей в область анализа и изменения виртуальных деталей-прообразов за счет более полного информационного насыщения CAD/CAE технологий данными экспериментального исследования детали-прототипа.

Список литературы:

1.Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). - Петербург: Питер, 2004.-560 с. 2. Кесарийский А.Г. Голографические исследования работоспособности двигателей внутреннего сгорания. В кн. Когерентная оптика и голография; Труды XXV школы-симпозиума, Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 1997, с.191 - 197. 2.Кесарийский А.Г. Влияние затяжки групповых резьбовых соединений на деформацию блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания. В сборнике научных статей " Прогресс-Технология-Качество: Труды Второго конгресса двигателестроителей Украины с иностранным участием, Киев-Харьков-Рыбачье, 22-25 сентября 1997г." .- Харьков, ИМиС, 1997, с. 235-237 3.Кесарийский А.Г. Комплексное применение методов голографической интерферометрии и конечноэлементного математического моделирования при отработке конструкции двигателя внутреннего сгорания// Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: Труды Международной научно-технической конференции, 23-25 апреля 2003, г. Челябинск – Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2003. с. 92-95. 4.Кесарийский А.Г. Разработка лазерно-интерференционных средств исследования напряженно-деформированного состояния деталей и узлов ДВС.: дис. к.т.н. // Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», Харьков, 2005.-241 с.