

КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЕ РЕСУРСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС

О.В. Акимов, А.П. Марченко

Рассмотрена задача разработки научных основ и методов проектирования литых деталей ДВС на основе компьютерно-интегрированного ресурсного подхода. Разработанный метод позволяет модернизировать конструкции и технологии изготовления литых деталей и выводит на более высокий уровень эксплуатационных характеристик двигателей.

Совершенствование показателей современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) невозможно без оптимизации их конструкции, будь-то двигатель как готовое изделие, его узлы или отдельные детали. Как показывает современный опыт, создание совершенной конструкции ДВС и обеспечение оптимальных его показателей невозможно, если в основу проектирования не заложены отвечающие сегодняшнему дню технологические аспекты изготовления деталей, из которых состоят узлы двигателя. Расчетные и экспериментальные методы определения конструктивной прочности, надежности и ресурса в обязательном порядке должны быть согласованы с теми закономерностями, которые определяют протекающие при изготовлении деталей физические, физико-химические, тепловые и т.п. процессы.

В современном двигателестроении до недавнего времени технологические особенности изготовления литых деталей либо вообще не учитывались, либо учитывались по простым методикам, что, в ряде случаев, приводило к серьезным проблемам. На наш взгляд, учет особенностей технологии изготовления литых деталей еще на стадии их проектирования является очень важной актуальной задачей, решение которой обеспечит улучшение показателей надежности и долговечности ДВС и повысит их конструктивное совершенство.

Таким образом, наличие компромисса между проектированием конструкции деталей и проектированием и реализацией технологического процесса их изготовления является определяющим фактором получения качественных деталей, обеспечивающих достижение заданных эксплуатационных характеристик и надежности ДВС. Технологические аспекты должны быть обязательно учтены при разработке и применении САПР для двигателей.

Точность геометрических размеров является одним из основных показателей качества литых деталей ДВС. При этом необхо-

димо отметить, что влияние полей отклонений от заданной геометрии литых деталей ДВС на параметрическую и функциональную надежность ДВС сегодня является мало исследованным вопросом.

Отсутствие методик определения влияния конструкции литой детали, колебаний размеров и литейных дефектов на напряженное состояние элементов будущей детали не позволяет прогнозировать прочностные характеристики отливок на этапе проектирования. Поэтому не удается и стабилизировать несущую способность литых деталей ДВС, заложив высокие её показатели на стадии изготовления путем оптимизации параметров технологического процесса [1-2].

Как представляется авторам данной работы, решение вышеприведенных проблем возможно лишь при разработке и применении научных основ и методов компьютерно-интегрированного ресурсного проектирования литых деталей ДВС, которые включают в себя весь современный компьютерный инструментарий CAD/CAE, CALS, Quick-Cast, 3D-Prototyping и других специальных программных продуктов.

Все большее внимание при анализе качества ответственных литых деталей ДВС сложной геометрической формы уделяется так называемому «системному подходу», при котором оценка качества заключается не только в анализе литейных дефектов, а и в реализации подхода, при котором формируются требования к литой детали как к элементу механической системы.

Стремительный рост производительности современных ЭВМ открывают новые возможности для повышения эффективности решения задач большой размерности со сложными структурными взаимосвязями, какими, несомненно, являются задачи оценки качества ответственных литых деталей ДВС сложной геометрической формы [4-5].

Одним из основных комплексных критериев оценки качества литой детали, применяемых при системном подходе, большинст-

во исследователей называют *величину ресурса (или надежности) литой детали ДВС*. Его также относят к «системным» критериям ввиду универсальности, характерности для обеспечения функционирования сложных систем. Ресурс является интегрированным показателем качества и тесно связан со всеми параметрами литой детали ДВС, объединяя:

- удачность выбора конструкции детали;
- величину и степень рассеивания значений рабочих нагрузок, испытываемых деталью в процессе ее функционирования, соответствием техническим условиям эксплуатации и т.д.;
- механические свойства металла, в частности средний уровень прочностных, пластических и специальных свойств металла литой детали; степень рассеивания указанных выше характеристик;
- величину остаточных напряжений в литой детали;
- наличие технологических дефектов [1, 3].

В настоящей работе рассматривается реальная литая деталь блок-картера ДВС 4ЧН12/14, которая изготавливается предприятиями Харьковской области.

Ранее применяемые технологии проектирования фактически не использовали методы расчетной оценки статической и динамической нагруженности блок-картера ДВС даже в приближенной постановке.

При проектировании учитывались конструкции лучших мировых аналогов и проводилась длительная экспериментальная работа по доводке конструкции [1].

Однако во время серийного производства и эксплуатации потребителями (в первые 2 года) на предприятие-изготовитель ДВС продолжали поступать рекламации из-за трещин блок-картера в характерных зонах.

Дополнительные испытания литых деталей при статическом (гидро-) нагружении не выявили опасных напряжений в исследуемых местах.

Авторами была поставлена задача разработать научные основы и методы компьютерно-интегрированного ресурсного проектирования блок-картера дизеля 4ЧН12/14, включающие:

- 1) создание 3D модели блок-картера ДВС и математических моделей инженерного моделирования и анализа;
- 2) моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) блок-картера

ДВС при статических рабочих и монтажных нагрузках;

3) моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) блок-картера ДВС при динамических рабочих нагрузках;

4) моделирование фазового перехода и остывания литой детали блок-картера ДВС;

5) решение термо-прочностной задачи для получения картины остаточных напряжений литой детали блок-картера ДВС;

6) проведение экспериментальных исследований для уточнения начальных, граничных условий и проверки адекватности полученных моделей;

7) внесение модернизирующих воздействий в конструкцию и технологию изготовления литой детали блок-картера ДВС с целью повышения эксплуатационных свойств ДВС, проверка этих воздействий на полученных моделях и экспериментальным путем.

В данной статье будут проиллюстрированы 3 и 4 этапы компьютерно-интегрированного ресурсного проектирования литой детали блок-картера ДВС 4ЧН12/14.

На 3 этапе для проверки усталостной природы возникающей трещины, была обоснована необходимость динамического анализа блок-картера как минимум в постановке анализа собственных колебаний – нижней части спектра собственных частот, форм колебаний и соответствующих форм динамических напряжений. Известно, что уровень и характер динамической нагруженности ответственных литых элементов ДВС существенно влияет на величину ресурса, имеющего статистический характер. Если зоны максимальных напряжений при собственных колебаниях совпадают с зонами возникающих при эксплуатации трещин, то это обосновывает необходимость принятия мер по модернизации конструкции литой детали ДВС с целью повышения ее надежности.

С этой целью была разработана сначала твердотельная [2] модель и получена пространственная конечноэлементная (КЭ) модель литой детали блок-картера (рис. 1). Число наложенных ограничений – 1730. Закреплялись две из трех степени свободы на внешней поверхности картера в плоскостях, перпендикулярных к оси вращения маховика (рис. 2). При расчете собственных частот (СЧ) и собственных форм (СФ) колебаний блок-картера для решения задачи о собственных значениях был использован численный метод «итераций подпространства» (для получения 5 первых собственных векторов использовалось 9 рабочих векторов). При

КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЕ РЕСУРСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС

относительной погрешности $1 \cdot 10^{-5}$ задача решалась за 12 итераций.

В таблице 1 приведены значения первых пяти собственных частот колебаний отливки блок-картера.

Таблица 1

i	1	2	3	4	5
ρ_i , Гц	288	409	589	671	751

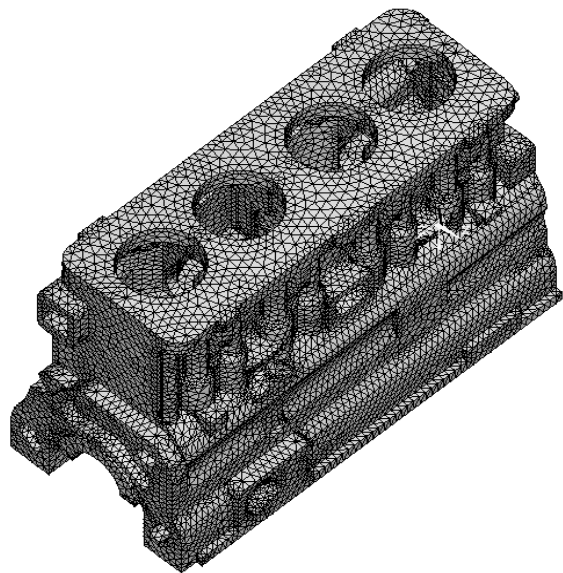


Рис. 1. Конечноэлементная модель литой детали блок-картера ДВС

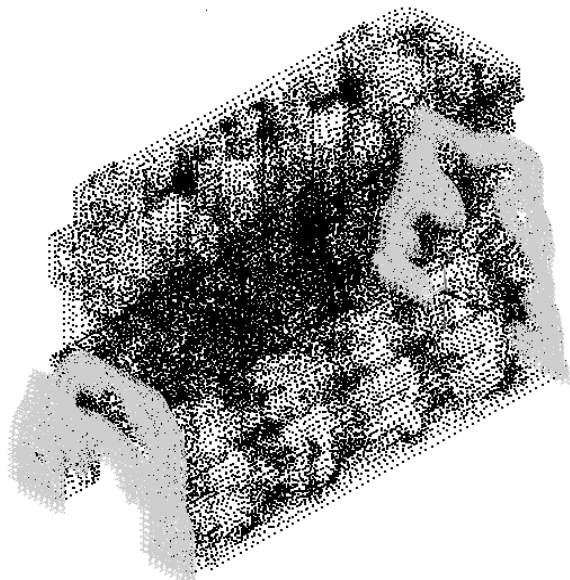


Рис. 2. Узлы КЭ модели литой детали блок-картера: серым – условия закрепления в узлах 2-х степеней свободы

Построенные твердотельная и конечно-элементная электронные модели реальной

литой детали блок-картера, позволили провести дальнейший анализ для оценки качества ответственных литых деталей сложной геометрической формы. Рассмотрена задача на собственные колебания литой детали. Получены первые пять СФ и СЧ колебаний, формы интенсивности динамических напряжений.

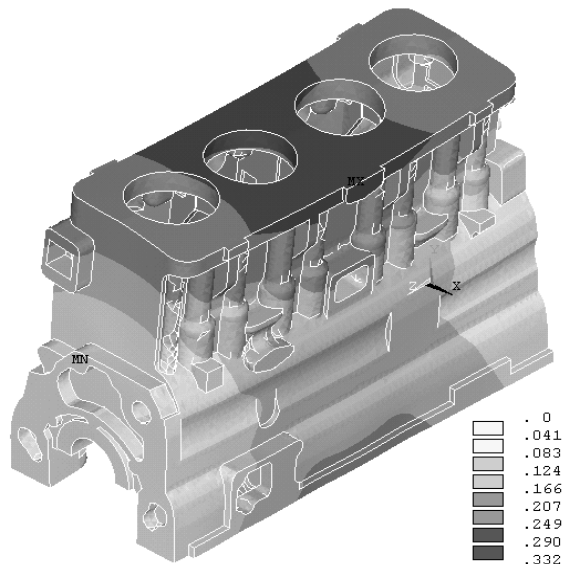


Рис. 3. Вторая собственная форма колебаний блок-картера ДВС, $\rho_2 = 409$ Гц

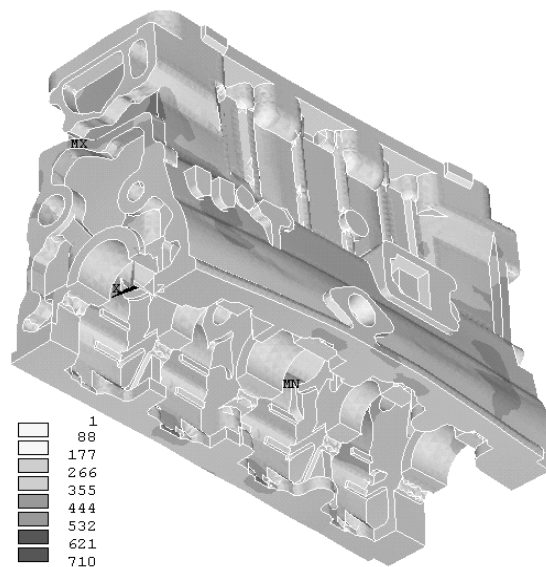


Рис. 4. Форма интенсивности динамических напряжений на второй СФ колебаний блок-картера ДВС, $\rho_2 = 409$ Гц

Анализ распределения интенсивности напряжений на первых пяти СФ колебаний показал расположение опасных напряжений

вблизи зоны возникновения трещин блок-картера в эксплуатации при возбуждении второй СФ колебаний (рис. 3 и 4). Это дало возможность рассматривать напряжения при таких колебаниях как снижающие качество и ресурс литой детали ДВС, разработать конструктивные предложения по перемещению зоны высоких напряжений на данной СФ. Были идентифицированы причины возникновения усталостных трещин во время эксплуатации и выработаны меры по модернизации конструкции блок-картера для снижения динамической нагруженности трещиноопасной зоны.

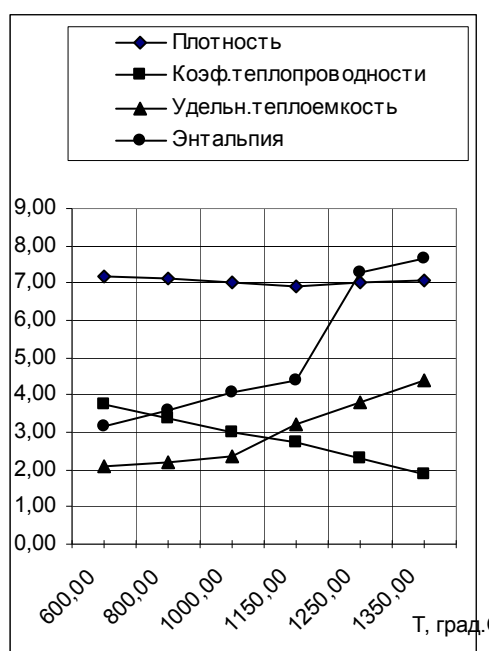


Рис. 4. Зависимость физических свойств чугуна отливки от температуры: 1 – плотность, кг/м³; 2 – коэффициент теплопроводности, Дж/(м·с·град); 3 – удельная теплоемкость, кДж/(кг·град); 4 – энтальпия $ent \cdot 10^{-9}$, Дж/м³

Вышеприведенные модели позволили провести дальнейший анализ на 4 этапе для оценки и управления качеством ответственных литых деталей ДВС сложной геометрической формы. На 4 и 5 этапах были проведены: анализ динамики охлаждения, фазового перехода, связанности зон, застывающих последними, что выявило места возможного формирования внутренних дефектов. Это дало возможность сформировать граничные и начальные условия для задачи расчета остаточных деформаций ввиду выравнивания температур по всей литой детали блок-картера, и, в конечном счете, ввести числен-

ную оптимизацию процесса затвердевания, а также разработать практические рекомендации для технологии управляемой кристаллизации.

На сегодняшний день, моделирование процесса фазового перехода, является задачей нестационарной и нелинейной и требует значительных машинных ресурсов. Для повышения точности моделирования были специально применены нелинейные начальные и граничные условия.

Нелинейные зависимости для плотности, коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и энтальпии изображены на рис. 4.

На рис. 5 и 6 даны некоторые из видов распределения полей температур и фазовых состояний литой детали блок-картера для различных значений времени застывания t .

На рис.7 показаны узлы КЭ модели, еще не перешедшие в фазовое состояние «солидус» в момент времени $t = 5600$ с, т. е. зоны литой детали, затвердевающие последними. По результатам расчета сформированы анимационные изображения полей температур для четырех положений блок-картера с шагом 100 с.

Проблемная зона не кристаллизовавшихся узлов приводит к появлению дефектов типа усадочной рыхлоты, пористости и раковин. Эти дефекты значительно снижают механические свойства литой детали ДВС и нарушают ее сплошность в зоне их возникновения. В результате это приводит к отбраковке литых деталей при гидроопрессовке или механической обработке, что не всегда возможно сделать в виду зачастую малых геометрических размеров дефектов. Еще большие экономические потери из-за постепенного проявления этих дефектов вызывают выходы из строя блок-картеров при эксплуатации.

На основе проведенных исследований и полученных моделей были разработаны модернизирующие изменения конструкции и технологии изготовления литой детали блок-картера ДВС 4ЧН12/14, которые охватили 603 поверхности, 5752 граничных линии. Толщина межцилиндровых перегородок была снижена до 7 мм, вес детали понижен на ~23 кг.

Эти изменения были проверены расчетно-экспериментальным путем. Полученные картины НДС и температурных полей кристаллизации литой детали блок-картера ДВС показали снижение динамических напряжений при пяти СФ и СЧ, отсутствие трещиноопасных зон и равномерную картину фазово-

КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЕ РЕСУРСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС

го перехода. Модернизации конструкции и технологии изготовления литой детали блок-картера ДВС 4ЧН12/14 были внедрены на производстве, что в итоге значительно повысило эксплуатационные параметры и ресурс серийных ДВС.

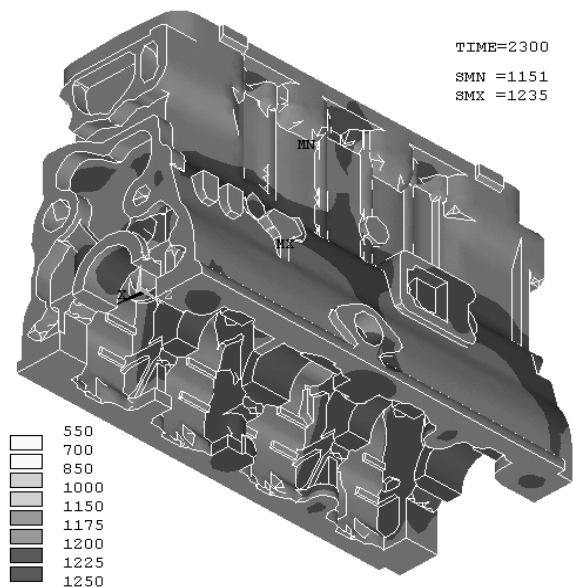


Рис. 5. Распределение полей температур: время застывания $t = 2300$ с

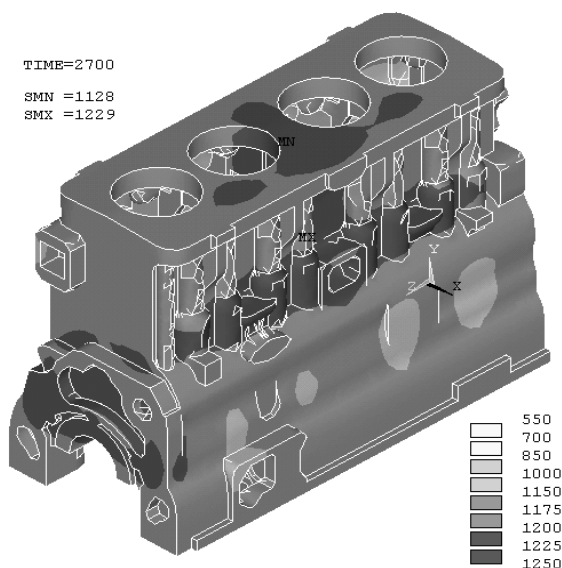


Рис. 6. Распределение полей температур: время застывания $t = 2700$ с

ВЫВОДЫ

Решена задача разработки научных основ и методов проектирования литых деталей ДВС на основе компьютерно-интегрированного ресурсного метода, позволяющая

модернизировать существующие конструкции и технологии изготовления литых деталей.

Разработанный метод выводит на более высокий уровень эксплуатационных характеристик при проектировании новых моделей ДВС.

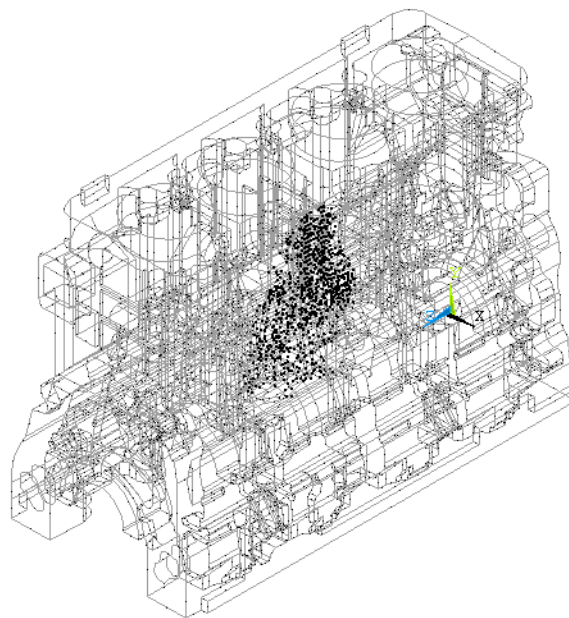


Рис. 7. Узлы КЭ модели, $t = 5600$ с: черным цветом отмечена проблемная зона узлов, не перешедших в твердое состояние

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование и доводка дизелей / И.А. Коваль, В.Ю. Вахтель, Б.С. Еременко, А.М. Диденко. - М.: Машиностроение, 1966. - С. 42.
2. Акимов О.В. Тенденции развития и применения автоматизированных компьютерных систем для проектирования и обеспечения качества литейных изделий // MicroCad-99. Сборник научных трудов межд. научно-технической конференции. - Харьков: Харьк. гос. политехн. ун-т, 1999. - Ч.2. - С.4-9.
3. Акимов О.В., Анацкий Ю.П., Солошенко В.А. Анализ собственных колебаний отливки блок-картера дизеля «СМД» // Вестник ХГПУ. - Вып.66, Новые решения в совр. технологиях. - Харьков, 1999. - С. 40-47.
4. Акимов О.В. Современные системы автоматизированного проектирования, инженерного анализа и технологической подготовки производства // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - Вып. 6(12). - 2004. - С. 21-36.
5. Акимов О.В. Современный САПР в литейном производстве // Металлообработка. Оборудование. Инструмент для профессионалов. - № 1(73). - 2006. - С. 32-35.