

С. П. Павлинич, А. С. Горюхин, А. Г. Сусенков, Е. С. Гайнцева

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В CALS-ТЕХНОЛОГИЯХ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассматриваются вопросы возможности применения экспертных систем в области литейного производства при разработке технологии новой номенклатуры изделий (лопатки турбин) и поиска причин возникновения брака. Дается алгоритмическая постановка решения задачи прогнозирования. *CALS-технологии; экспертная система; модуль; отливка; качество*

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных направлений интенсификации и повышения экономической эффективности производства является широкое внедрение автоматизированных систем на базе ЭВМ в сферу проектирования изделий, технологических процессов и оборудования.

Современные промышленные информационные технологии базируются на концепции единого информационного пространства / среды (объединения информационных ресурсов) промышленного предприятия. Эта концепция получила за рубежом название CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) «...стратегия последовательного преобразования существующего процесса в единый компьютеризированный и информационно-интегрированный процесс управления жизненным циклом» [1].

Благодаря системному внедрению в промышленность современных способов компьютерного проектирования и моделирования продукции достигается качественно новый уровень производства и производственных отношений: существенно сокращаются сроки разработки, подготовки производства и выпуска продукции, сокращаются трудоемкость, материалоемкость, энергоемкость и потребность в других видах ресурсов, необходимых для разработки и производства продукции, появляется возможность расширения ассортимента выпускаемой продукции, обеспечиваются условия для повышения уровня сложности и качества выпускаемой продукции, повышаются доля творческой составляющей в работе и квалификация персонала.

Использование CALS-технологий в литейном производстве обеспечивает повышение технико-экономической эффективности литейного производства за счет сокращения сроков и снижения трудоемкости технологической под-

готовки производства новой номенклатуры отливок, уменьшения металлоемкости отливок и затрат на их механическую обработку, предупреждения образования дефектов в отливках.

Целесообразно при решении задач управления сложными многопараметрическими и взаимосвязанными системами, объектами, производственными и технологическими процессами пользоваться экспертными системами (ЭС).

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Одним из перспективных направлений в использовании ЭВМ в литейном производстве является автоматизированное проектирование технологических процессов производства отливок и предупреждение брака.

Перед запуском каждой новой отливки в производство технология ее изготовления должна быть выбрана на основе научных принципов.

Решение прикладной задачи с помощью ЭС – это всегда целеустремленный итеративный процесс, имеющий целью выработку решения, наилучшего с некоторой точки зрения.

В большинстве ЭС сейчас используются поверхностные знания. Введение глубинных представлений позволяет создавать базу знаний (БЗ) большей мощности, так как глубинные знания более гибки и адаптивны, чем достаточно жесткие поверхностные [2].

Применение ЭС в литейном производстве позволит при получении отливок формировать не только само решение, а процесс – ход решения, что порой является более ценным.

При разработке технологии новой номенклатуры отливок необходимо учитывать совокупность множества технологических параметров, что является достаточно сложным и трудоемким. Правильный анализ технологических факторов позволит выявить причины возникновения брака, а также найти пути его снижения.

В литейном производстве разработка технологии получения отливки является недостаточно формализованным процессом, зачастую нехватка высококвалифицированных технологов («экспертов») приводит к необходимости производства трудоемких и дорогих опытных партий. ЭС в свою очередь является одновременно инструментом и результатом формализации технологических процессов и процессов выявления знаний эксперта.

В настоящее время технологии составляются по принципу «подобия», из-за сложности учета всех факторов зачастую некоторые данные «выпадают» из расчетов. Поэтому применение ЭС на этапе проектирования позволит учесть большее количество факторов, что в свою очередь позволит предупредить возникновение дефектных отливок.

Актуальность создания ЭС в области технологического проектирования вызвана стремлением облегчить и ускорить процесс разработки технологии, также дает возможность связать ранее рассматриваемые отдельно факторы воедино и объяснить их взаимосвязь, уменьшить брак, позволяя тем самым существенно экономить материальные и временные ресурсы.

Применение ЭС имеет ряд преимуществ по сравнению с человеком-экспертом:

1. **Постоянство.** Человеческая компетенция ослабевает со временем. Перерыв в деятельности человека-эксперта может серьезно отразиться на его профессиональных качествах.

2. **Легкость передачи.** Передача знаний от одного человека другому – долгий и дорогой процесс. Передача искусственной информации – это простой процесс копирования программы или файла данных.

3. **Устойчивость и воспроизводимость результатов.** Экспертные системы устойчивы к «помехам». Человек же легко поддается влиянию внешних факторов, которые непосредственно не связаны с решаемой задачей. Эксперт-человек может принимать в тождественных ситуациях разные решения из-за эмоциональных факторов. Результаты экспертной системы – стабильны.

4. **Стоимость.** Эксперты, особенно высококвалифицированные, обходятся очень дорого. Экспертные системы, наоборот, сравнительно недороги. Их разработка дорога, но они дешевы в эксплуатации [3].

Вместе с тем разработка ЭС не позволяет полностью отказаться от эксперта-человека. Хотя ЭС хорошо справляется со своей работой, тем не менее, в определенных областях челове-

ческая компетенция явно превосходит искусственную. Однако и в этих случаях ЭС может позволить отказаться от услуг высококвалифицированного эксперта, оставив эксперта средней квалификации, используя при этом ЭС для расширения его профессиональных возможностей [3].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем виде алгоритмическая постановка задачи представляется следующим образом:

- инженер по знаниям наполняет базу БЗ, т. е. обучает ЭС;
- пользователь задает системе запрос;
- интеллектуальный интерфейс уточняет запрос и формулирует цель для машины вывода;
- машина вывода пытается достичь заданную цель на основе знаний, полученных из БЗ;
- цель не была достигнута из-за недостатка данных;
- интеллектуальный интерфейс технических систем связывается с соответствующими источниками данных;
- машина вывода вновь пытается достичь цели;
- цель не была достигнута из-за получения противоречивых выводов;
- для разрешения возникших противоречий запускается механизм самообучения, который пытается разрешить возникшие противоречия на основе заложенных в него правил;
- новые знания, полученные в ходе работы механизма самообучения, поступают в редактор БЗ;
- инженер по знаниям принимает или отвергает новые знания и факты;
- новые знания и факты заносятся в базу данных (БД) и БЗ;
- возврат к п. 4 [2].

Постановка задачи проектирования технологии получения отливки с применением ЭС

В современном понимании ЭС – это узкоспециализированный программный комплекс, позволяющий либо очень быстро принимать стандартные решения (чаще всего по управлению техническими объектами), либо на основе длительного диалога с пользователем помогать в выборе некоторого решения (путем оценки вариантов, предлагаемых пользователем, и их коррекции с учетом множества факторов, воз-

можно неизвестных пользователю, а также предложения собственных вариантов решения и их коррекции в соответствии с целями пользователя).

Не все ЭС имеют подсистему объяснений. Ее отсутствие может быть связано с трудностью программирования, но чаще обусловлено недостатками самой модели представления знаний. В классическом смысле подсистема объяснений существует только у систем, основанных на правилах продукций, нейросетях и семантических сетях.

Представлены три модуля экспертной системы: назначение припусков на механическую обработку отливок, выбор положения сложных отливок при заливке и поиск мест для установки прибылей, прогнозирование дефектов в готовых изделиях и брака.

3. НАЗНАЧЕНИЕ ПРИПУСКОВ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ

Общий припуск на механическую обработку – одна из главных характеристик норм точности отливок. Общий припуск на механическую обработку назначают для устранения погрешностей размеров, формы и расположения поверхности, неровностей и иных дефектов поверхности, которые формируются при изготовлении отливки. Величина общего припуска должна обеспечивать все операции механической обработки, которые необходимы для достижения параметров и норм точности, назначенных на конструктивные элементы детали [4].

Основной задачей припуска является обеспечение при осуществлении механической обработки отливки:

- заданных требований по размерной точности (рис. 1) обрабатываемых конструктивных элементов литой детали;
- заданных требований по точности формы и расположения поверхности обрабатываемых конструктивных элементов отливки;
- заданных требований по точности или шероховатости поверхностей литой детали, подвергаемых механической обработке [4].

Одной из задач на пути построения экспертной системы является разработка программы для назначения припусков на механическую обработку по ГОСТ 26645-85.

В общем виде математическая постановка задачи представляется следующим образом:

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где Y – степень точность или величина припуска, (x_1, x_2, \dots, x_n) – параметры, такие как масса, базовый размер, вид окончательной механической обработки и т. п.

Сложность назначения припусков состоит в том, что ГОСТ 26645-85 не дает никакой алгоритмической последовательности, что сильно усложняет назначение припуска. Зачастую технолог не может правильно справиться с этой задачей, либо затрачивает на это множество усилий и время.

Универсальность программы состоит в том, что она позволяет определять основные параметры точности отливки: класс размерной точности, степень коробления, степень точности поверхностей, класс точности массы и допуск смещения, а также сам припуск для всех отливок независимо от технологического вида литья, типа формы, вида термообработки, типа сплава и т. п.

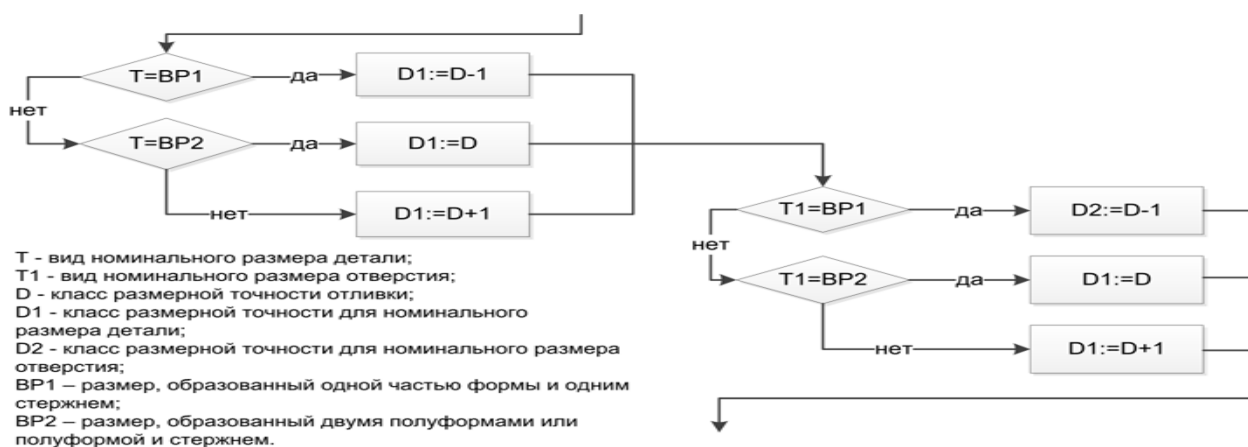


Рис. 1. Фрагмент алгоритма программы САПР ПРИПУСК: переназначение класса размерной точности

Используя ГОСТ 26648-85, авторы составили методику назначения припусков на механическую обработку и разработали алгоритм. На основании этого алгоритма с помощью Delphi – инструмента для создания приложений и систем, функционирующих на платформе Windows, была реализована программа САПР ПРИПУСК [5].

4. ВЫБОР ПОЛОЖЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОТЛИВОК ПРИ ЗАЛИВКЕ И ПОИСК МЕСТ ДЛЯ УСТАНОВКИ ПРИБЫЛЕЙ

Отливка в форме может располагаться горизонтально, вертикально или наклонно. Различные положения отливки в форме определяются ее конструкцией. Правильная ориентация отливки и расположения прибылей обеспечивает высокое качество отливки. На то, как будет расположена отливка, где и какие (открытые или закрытые) прибыли устанавливать, влияет множество факторов: неравномерность толщины стенок, расположение и геометрические размеры тепловых узлов, конусность (отрицательная или положительная), длинные протяженные поверхности и т. п.

Для определения размеров прибылей отливок зачастую следует воспользоваться методом Г. Ф. Василевского, который все варианты питания отливки, в зависимости от ее положения при заливке и размещения прибылей, сводит к двум типовым схемам: первая схема характеризуется установкой прибылей на горизонтальные стенки, а вторая – на вертикальные стенки отливок.

Характеристики прибылей выражаются в виде следующих безразмерных соотношений:

$$a/T; Hn/a; Ho/T; \sum ai \cdot 100/K; \sum bi \cdot 100/L, \quad (2)$$

где a_i и b_i – соответственно ширина и длина основания прибыли, Hn и dn – высота и диаметр основания прибыли, Ho – высота отливки, T , K и L – соответственно толщина, ширина и общая протяженность питаемого узла, h – высота напуска.

При изучении строения материала отливки всегда обнаруживается, что области, примыкающие к прибыли и вблизи торцов литой детали, характеризуются наибольшей плотностью, и как следствие, лучшими свойствами металла. В более удаленных же от прибыли и торцов объемах отливки качество металла обычно хуже и она может быть поражена усадочными дефектами. Причем попытки устранить эти дефекты путем простого увеличения объема прибыли во многих случаях оказываются безуспешными.

Радиус действия прибыли фактически представляет собой расстояние от ее края до грани-

цы области плотного металла в отливке. При анализе эту характеристику принято количественно выражать числом n толщин стенки отливки, укладываемых в указанном промежутке, т. е.

$$l_{пр} = n\delta_{отл}, \quad (3)$$

где $l_{пр}$ – радиус действия прибыли, n – количество, $\delta_{отл}$ – толщина стенки отливки.

Аналогично оценивается и степень влияния торцов отливки на усадочные процессы в ней.

Следует отметить, что радиус действия прибыли и торцевой эффект существенно зависят от температур формы и заливки металла, теплофизических характеристик их материалов, толщины стенки и соответствия конструкции литой заготовки требованиям направленного затвердевания и других факторов.

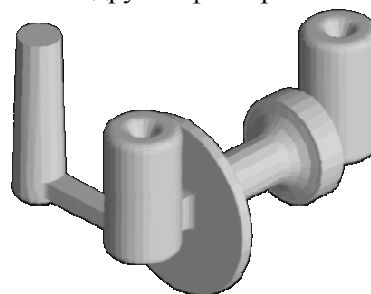


Рис. 2. Трехмерная модель отливки

При всем этом должно быть соблюдено условие направленного затвердевания отливки. Из-за сложности учета всех этих факторов экспертом целесообразно переложить эту функцию на ЭС и привлекать эксперта в спорных случаях.

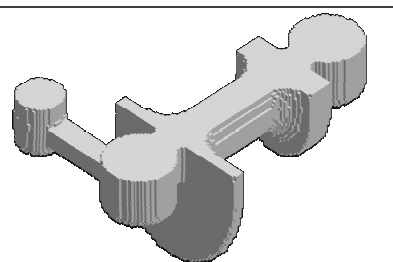


Рис. 3. Регулятивно разбитая модель

Работа ведется с трехмерной моделью отливки (рис. 2). Принцип, положенный в основу – метод конечных элементов путем дискретизации наложением сетки. При этом методе область пространства разбивается на $n_1 \cdot n_2 \cdot n_3$ прямоугольных ячеек одинакового размера, т.е. происходит регулятивное разбиение пространства (рис. 3). Для каждой такой ячейки создается список объектов, имеющих с ней непустое пересечение (рис. 4).

Регулятивное разбиение в сечении описывается массивом $a(i:j)$, где a – ячейка, i – строка, j – столбец. То есть

- $a(1:1)$ – пустая (0).
- ...
- $a(7:3)$ – принадлежит объекту 1.
- ...
- $a(9:5)$ – принадлежит объекту 1.
- ...
- $a(10:10)$ – пустая.
- ...
- $a(11:14)$ – принадлежит объекту 2.
- ...
- $a(16:15)$ – принадлежит объекту 2.
- ...
- $a(20:20)$ – пустая.

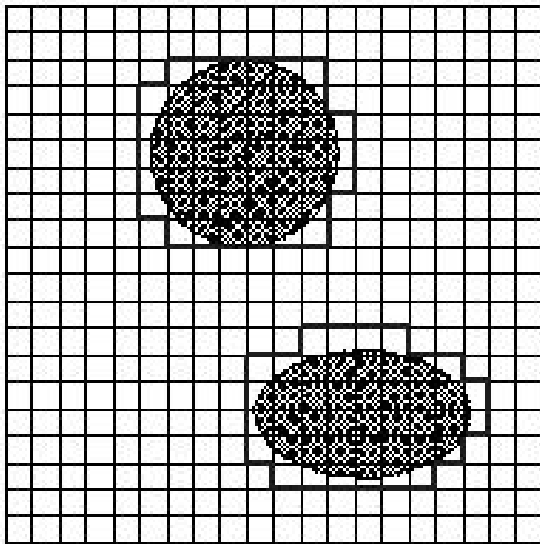


Рис. 4. Регулярное разбиение в двумерном случае

Таким образом, регулятивное разбиение в пространстве фактически представляет собой трехмерный массив, элементами которого являются списки объектов. Происходит комплексный анализ расположения всех дискретных ячеек. На основе совместного использования полученных данных и базы экспертных знаний делается вывод о преимущественной конфигурации отливки при заливке, а также указываются места, где необходимо ставить прибыли.

5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В ОТЛИВКАХ И ГОТОВЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Качество детали, получаемой литьем, складывается в процессе получения отливки. Экономический эффект производства возрастает с уменьшением количества дефектов в изделии и брака. Одними из основных причин брака

являются нетехнологичность конструкции деталей и несовершенство технологического процесса. Современный уровень развития процесса литья допускает отливку весьма сложных деталей. Однако в предупреждении брака невозможно обойтись без экспертной оценки технологии ее получения. После доработки технологического процесса должна быть полная уверенность в том, что он надежно обеспечивает получение годных отливок и что каждый случай брака является следствием нарушения технологии. Из-за сложности учета всех факторов, влияющих на появление дефектов, целесообразно переложить эту обязанность с человека-эксперта на экспертную систему.

В экспертную систему вносятся причины и дефекты. Совокупность тех или иных причин вызывает появление определенного дефекта.

$$D = F(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (4)$$

где D – дефект, (p_1, p_2, \dots, p_n) – причина возникновения данного дефекта.

Изучается влияние на дефект двух или более факторов, применен метод многофакторного дисперсионного анализа.

Для решения поставленной задачи применяются уже найденные зависимости «причины-дефект» в комплексе с прикладной статистикой. То есть совместно используются детерминированные и вероятностные методы описания данных. В основу анализа положена жестко детерминированная факторная модель, позволяющая идентифицировать и дать сравнительную характеристику основных причин, влияющих на изменение того или иного дефекта в отливке. С помощью детерминированных методов можно проанализировать только те данные, которые имеются в распоряжении. Использовать их для прогнозирования дефектов можно лишь на основе вероятностно-статистического моделирования. Математической основой прикладной статистики и статистических методов анализа является теория вероятностей и математическая статистика.

В общем случае статистикой называют измеримую функцию наблюдений

$$T(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – выборка.

Механизм самообучения этого модуля экспертной системы реализован на получении новых статистических данных и их анализе, а также при необходимости через диалог с экспертом, вследствие невозможности учета всего комплекса причин возникновения дефектов, к примеру «человеческого фактора».

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, применение экспертных систем в литейном производстве позволяет существенно ускорить и облегчить процесс технологического проектирования изделия.

2. Предложены алгоритм работы экспертной системы и алгоритм ее обучения для задач технологического проектирования.

3. Приведенные методики по назначению припусков на механическую обработку, выбору положения отливки при заливке и поиска мест для установки прибылей, а также прогнозирование дефектов в готовых изделиях и брака показали возможность и необходимость создания комплексной экспертной системы.

4. Для решения задач прогнозирования дефектов предложена методика совместного использования детерминированных и вероятностных методов описания данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кривошеев И. А.** Внедрение компонентов CALS-технологии в авиадвигателестроении: проблемы и перспективы // Наука и образование: электрон. науч.-техн. изд. 2005. URL: [http:// technomag.edu.ru](http://technomag.edu.ru) (дата обращения: 15.02.2010)

2. **Смолин Д. В.** Введение в искусственный интеллект: конспект лекций. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 208 с.

3. Портал искусственного интеллекта. [2010] URL: <http://www.aiportal.ru> (дата обращения: 18.03.2010).

4. **Моргунов В. Н.** Основы конструирования отливок. Параметры точности и припуски на механическую обработку: Учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 164 с.

5. **Горюхин А. С., Гайнцева Е. С.** САПР ПРИПУСК. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613405. 2008.

ОБ АВТОРАХ

Павлинич Сергей Петрович, зав. каф. машин и технологии литейного произв-ва, первый зам. ген. дир. – техн. дир. ОАО УМПО. Д-р техн. наук, проф. Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиац. промышленности.

Горюхин Александр Сергеевич, доц. той же каф. Дипл. инж.-мех. по металлореж. станкам и инструментам (УАИ, 1965). Канд. техн. наук по литейн. произв-ву в авиадвигателестроении (МВТУ им. Баумана, 1979). Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиац. промышленности.

Сусенков Алексей Геннадьевич, ст. преп. каф. начертательн. геометрии и черчения. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1982). Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиац. промышленности.

Гайнцева Екатерина Сергеевна, соиск. каф. автоматизированных систем управления. Дипл. инж. (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. искусственного интеллекта.