

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В.Б. Мелехин (ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»),
В.М. Хачумов (ФИЦ ИУ РАН, ИПС им. А.К. Айламазяна РАН)

Разработана модель представления декларативных знаний автоматической системы проектирования технологических маршрутов (ТМ) в виде фреймоподобной семантической сети, позволяющей формальным образом описывать обрабатываемые заготовки и изготавливаемые из них детали и на этой основе устанавливать имеющиеся между ними различия. Предложена процедурная модель представления знаний, включающая два типа фреймоподобных структур, обеспечивающих возможность на основе выявленных различий между формальным описанием заготовок и деталей, определять необходимые для их устранения технологические операции. Синтезированы процедуры вывода решений, обеспечивающие автоматическое определение порядка механической обработки различных поверхностей заготовок и проектирование на этой основе ТМ изготовления из них заданных деталей. Приведен пример решения задачи подтверждающий эффективность применения предложенных процедур для автоматического проектирования ТМ изготовления различных деталей в машиностроении¹.

Ключевые слова: интеллектуальная система, автоматическое проектирование, технологический маршрут, технологические операции, модель представления знаний, процедуры вывода решений.

Введение

К одной из основных и сложных задач эффективного управления проектированием технологических процессов, связанных с механической обработкой заготовок в процессе изготовления различного вида деталей в машиностроении, следует отнести автоматическое построение технологических маршрутов (ТМ) [1,2]. Решение данной проблемы для гибкой автоматической технологической линии (ГАТЛ) возможно с привлечением технологий искусственного интеллекта. Это обусловлено тем, что в современных САПР технологических процессов [3] задача автоматического проектирования ТМ ввиду ее высокой сложности эффективным образом фактически не решается, так как для этого требуется формализация творческой деятельности технолога-проектировщика. Проектирование в лучшем случае осуществляется высококвалифицированным технологом в диалоговом режиме с ЭВМ и сводится к выбору нужных технологических операций (ТО) и их упорядоченному размещению в разрабатываемом маршруте [4, 5].

Наиболее близкими к рассматриваемому направлению автоматического синтеза являются работы [6, 7], использующие автоматический синтез и машинное обучение. Отметим работу [8], в которой проектирование нового изделия осуществляется на основе статистического анализа множества прецедентов. Из анализа зарубежных работ следует вывод об отсутствии на данный момент инструментальных средств создания универсальных средств автоматической разработки ТМ.

Решить проблему предлагается путем создания интеллектуальной системы управления автоматическим проектированием (ИСУАП) маршрутов технологического процесса, что сводится к решению следующих основных задач.

1. Разработка декларативных моделей G_3 и G_d представления знаний, позволяющих формальным обра-

зом описать форму и размеры различного вида заготовок $S = \{s_i\}, i = \overline{1, n}$ и $S^* = \{s_i^*\}, i = \overline{1, n}$ изготавливаемых из них деталей соответственно.

В этом случае исходные данные для автоматического построения ТМ будут определяться парой $\langle G_3, G_d \rangle$, позволяющей автоматически определить различия между формой и размерами поверхностей произвольных заготовок $s_i \in S$ и изготавливаемых из них деталей $s_i^* \in S^*$.

2. Синтез модели представления процедурных знаний ИСУАП, включающих формальное описание различных ТО, условий и параметров их реализации для автоматического построения ТМ обработки заготовок $s_i \in S$ с целью получения из них требуемых деталей, обладающих заданным уровнем качества.

3. Разработка процедур вывода решений в процессе автоматического построения ТМ механической обработки заготовок $s_i \in S$ на основе заданной модели представления знаний.

Рассмотрим один из эффективных вариантов решения сформулированной в общем виде задачи на основе следующих инструментальных средств искусственного интеллекта.

1. Семантические сети [9] для построения фреймоподобных сетевых структур представления декларативных знаний, определяющих формальное описание заготовок и готовых деталей.

2. Модели представления процедурных знаний, включающие следующие два вида типовых элементов:

— позволяющие выявлять требуемые ТО по различиям, наблюдаемым между моделями заготовок и готовых деталей, а также параметры их реализации. Каждый такой элемент в зависимости от вида и характеристик соответствующего ему различия может обеспечивать решатель задач информацией для оценки толщины съема металла для одного прохода, число проходов в процессе реализации ТО, скорость резания, положение и крепление заготовок на станке с ЧПУ при обработке, положение инструмента и т.д.

¹ Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-29-12839 офн_м

Иначе говоря, обеспечивать информацией процесс управления автоматическим проектированием отдельных ТО. Назовем такие элементы представления процедурных знаний фреймами различий (ФР);

— представляющие собой фреймы описания ТО (ФТО), определяющие параметры, условия и результаты их реализации.

3. Процедуры вывода решений в процессе автоматического проектирования ТМ механической обработки заготовок на ГАТЛ в пространстве подзадач на основе типовых элементов представления процедурных знаний.

Структура модели представления знаний ИСУАП ТМ

Пусть ГАТЛ, служащая для механической обработки заготовок $S = \{s_i\}, i = \overline{1, n}$, включает все необходимое для этого оборудование: (станки с ЧПУ), транспортную систему и систему технического зрения, позволяющую определять их геометрические размеры и осуществлять контроль над качеством обработки заготовок на протяжении всего технологического процесса. Это позволяет организовать ИСУАП ТМ, сформировав необходимую для этого модель представления знаний и процедуры вывода решений. В общем случае модель представления знаний ИСУАП состоит из декларативной и процедурной составляющих.

Для формирования модели представления декларативных знаний и обеспечения возможности оперативного их поиска для вывода решений множество изготавливаемых деталей $S^* = \{s_i^*\}, i = \overline{1, n}$ целесообразно разбить на классы и подклассы $S_j^* \subset S^*, j = \overline{1, m_1}$, аналогичные по форме и габаритным размерам элементов. Необходимость такого разбиения готовых деталей на подклассы обусловлена еще и тем, что для обработки заготовок различных размеров, как правило, требуется специального вида оснастка, инструменты и т. д. Таким образом, каждый класс будет определяться идентификатором v_j , соответствующим форме деталей $s_i^* \in S^*$, например, ступенчатые валы, зубчатые шестерни и т. д. Подклассы же готовых деталей $S_j^* \subset S^*$, относящиеся к каждому из классов v_j , можно охарактеризовать различными интервальными значениями их основных габаритных размеров. Используя лингвистические переменные, каждый класс на основе данных, полученных экспертным путем, можно разбить на следующие пять подклассов: «очень малые», «малые», «средние», «большие» и детали, имеющие «очень большие» габаритные размеры.

Отметим, что множество заготовок $S = \{s_i\}, i = \overline{1, n}$ в соответствии с принятым разбиением множества S^* на классы и подклассы аналогичных друг другу деталей также разбивается на m_1 классов $S_j \subset S$, каждому из которых биективно соответствует один из исходных подклассов $s_j^* \subset S^*$. В общем случае, для формального описания заготовок $S_i \in S_j$, относящихся к одному подклассу, строится биективно соответствующая ему семантическая сеть $G_j = (V_j, E_j)$, где V_j и E_j — множества ее вершин и ребер соответственно.

Каждая вершина $v_{kj} \in V_j, k = \overline{1, m_{2j}}$ в семантической сети G_j определяется k -й обрабатываемой поверхностью заготовок $s_i \in S_j$ и помечается формой этой поверхности, а также ее геометрическими размерами. Например, вершина $v_{kj} \in V_j$ определяется цилиндрической поверхностью, имеющей диаметр d_k и длину l_k . Таким образом, каждая вершина $v_{kj} \in V_j$ сети G_j , в свою очередь, фактически представляет собой помеченный звездообразный граф $G_k = (v_k, V_k, E_k)$, в котором:

v_k — базовая вершина или идентификатор графа G_k , определяющий геометрическую форму соответствующей ей обрабатываемой поверхности заготовок $s_i \in S_j$, например, цилиндр, окружность, плоскость и т. д.;

V_k — упорядоченное множество вершин-слотов, ячейки которых заполняются размерами геометрических характеристик соответствующей им поверхности поступивших на вход технологической линии заготовок. Иными словами, конкретные значения размеров для заполнения данных слотов определяются информационно-измерительной системой, входящей в структуру ГАТЛ, путем замеров одноименных с ними геометрических размеров обрабатываемых поверхностей заготовок;

E_k — ребра, помечаются формой, размерами и другими характеристиками обрабатываемой поверхности, например, длина, ширина, диаметр и т. д.

Ребра E_j в семантической сети G_j определяются отношениями пространства состояний, которые выполняются между различными смежными поверхностями обрабатываемых заготовок $s_i \in S_j$. Например, поверхность F_1 переходит в F_2 , поверхность F_1 расположена выше поверхности F_2 , поверхность F_1 является частью поверхности F_2 и т. д.

Аналогичным образом строится и модель описания для каждого вида относящихся к одному подклассу готовых деталей в виде семантической сети $G_j^* = (V_j^*, E_j^*)$, у которой описание каждой вершины $v_j^* \in V_j^*$ в виде подграфа $G_k^* = (v_k^*, V_k^*, E_k^*)$ дополняется такими характеристиками соответствующей ей поверхности, как точность и чистота обработки поверхностей.

Пусть информационно-измерительная система обладает способностью автоматически определять размеры поступающих на обработку заготовок и соответствующих им готовых деталей по:

1) заданным технологическим чертежам заготовок и готовых деталей при условии, что в последнем чертеже поверхности пронумерованы в порядке выполнения над ними различных ТО в процессе их обработки. Кроме того, на данных чертежах отражены геометрические размеры одноименных в заготовках и деталях поверхностей, то есть измерительная подсистема ИСУАП может снять их размеры до и после механической обработки заготовок. В этом случае автоматически помечаемые по чертежам формальные модели описания заготовок и получаемых из них деталей могут быть представлены в виде простых цепей. Тогда простая цепь, формально описывающая изготавливаемые детали, фактически будет определять

структуру ТМ обработки поступающих на вход заготовок. Следовательно, для автоматического построения ТМ остается выявить ТО и параметры их реализации, необходимые для устранения различий между формальным описанием заготовок и моделями готовых деталей;

2) внешнему виду заготовок и получаемых из них деталей. В этом случае система технического зрения ИСУАП выполняет следующие операции:

— в произвольном порядке одинаково нумерует различные подлежащие обработке поверхности заготовок $s_i \in S_j$ и одноименные с ними поверхности в готовых деталях $s_i^* \in S_j^*$, приняв одну из крайних поверхностей за точку отчета;

— проводит анализ и измеряет геометрические размеры поверхностей заготовок и деталей, а затем на этой основе в решающей системе помечаются вершины соответствующих им семантических сетей $G_i = (V_i, E_i)$ и $G_i^* = (V_i^*, E_i^*)$.

Для упорядочения хранящихся в базе ИСУАП декларативных и процедурных знаний для каждого подкласса $s_j^* \in S^*$ готовых деталей целесообразно определить кортеж предельных габаритных размеров. Например, для многоступенчатых валов габаритные размеры для каждого подкласса в соответствующем ему кортеже будут определяться парами < диаметр ($d_{jz} - d_{jz+1}$), длина ($h_{jz} - h_{jz+1}$) >, $z = \overline{1,5}$, в интервалы численных значений элементов которой попадают габаритные размеры изготавливаемых деталей. Это позволяет для каждого подкласса деталей определить необходимые типовые процедурные знания ФР и ФТО для автоматического проектирования ТМ. Структура каждого ФР в общем случае имеет следующий формат описания:

«Идентификатор» «допустимый вид различия» «ТО»,

где: «идентификатор» определяется формой и номером поверхности заготовки, отличающихся от одноименной с ней поверхности детали. Различие определяется путем сравнения значений одноименных пометок вершин в графах $G_{kj} = (v_{kj}, V_{kj}, E_{kj})$ и $G_{kj}^* = (v_{kj}^*, V_{kj}^*, E_{kj}^*)$. Иначе говоря, «идентификатор» ФР соответствует одному из возможных и допустимых различий между одноименными поверхностями в заготовках и готовых деталях. Например, идентификатор различия может выражаться в наличии отверстия на одной из поверхностей готовой детали $s_i^* \in S_j^*$, изготавливаемой из заготовки $s_i \in S_j$. Если при этом наблюдается недопустимое различие, например, в виде трещины, то заготовка бракуется автоматической подсистемой контроля и в дальнейшей обработке не участвует;

«допустимый вид различия» — либо количественная оценка отклонения между одноименными размерами одной и той же поверхности в заготовке и готовой детали, либо имеющееся между ними различие в виде изменения рельефа поверхности и его характеристик, например, при наличии на поверхности готовой детали плоскости, пазов или отверстий;

«ТО» — идентификатор соответствующего ей ФТО, ТО которого позволяет устранить различие, наблюдаемое между размерами одноименных поверхностей или их внешним видом в формальном описании заготовок $s_i \in S_j$ и готовых деталей $s_i^* \in S_j^*$. В общем случае каждый ФТО имеет следующий формат описания:

«Идентификатор» «вход» «процедуры» «выход»,

где: «идентификатор» — определяется формой или названием обрабатываемой поверхности k в сочетании с названием ТО, входящей в структуру «процедур» ФТО;

«вход» — формальное описание исходного состояния обрабатываемой поверхности в виде семантической сети $G_k = (v_k, V_k, E_k)$, у которой базовая вершина v_k помечена видом обрабатываемой поверхности, а остальные вершины V_k представляют собой слоты, которые определяются названиями соответствующих им размеров обрабатываемой поверхности и заполняются значениями одноименных с ними размеров идентичной поверхности v_k в формальном описании заготовок $s_i \in S_j$;

«выход» — семантическая сеть $G_k^* = (v_k^*, V_k^*, E_k^*)$, в которую преобразуется семантическая сеть $G_k = (v_k, V_k, E_k)$ в результате отработки ТО, входящей в структуру «процедур» ФТО. Вершины V_k^* в сети G_k^* определяются двухместными слотами, одна ячейка в которых заполняется значениями одноименных с ними размеров идентичной поверхности v_k , в формальном описании готовых деталей $s_i^* \in S_j^*$.

Другая ячейка в слотах V_k^* заполняется значениями одноименных с ними размеров поверхности v_k , которые получены в результате выполнения ТО из ФТО. Это позволяет организовать контроль над качеством выполнения ТО по отклонениям между требуемыми и фактически полученными размерами обрабатываемых поверхностей;

«процедуры» — определяются ТО, которая позволяет преобразовать «вход» ФТО в его «выход», а также параметрами, требуемой оснасткой и инструментами, необходимыми для реализации этой операции. Часть параметров, определяющих условия и режимы реализации ТО, которые не зависят от размеров устраняемого с ее помощью различия между заготовкой $s_i \in S_j$ и готовой деталью $s_i^* \in S_j^*$, априори задается в структуре «процедур» ФТО. Например, положение и крепление заготовки, положение режущего инструмента и т. д. Другая часть параметров и режимов реализации ТО из ФТО определяется по величине и виду устраняемого с ее помощью различия, например, число проходов режущего инструмента, необходимых для устранения установленного различия с учетом припуска на шлифование и т. д. Кроме того, «процедуры» включают в свою структуру инструменты, позволяющие вычислять отклонения между размерами поверхности, занесенными в различные ячейки одного и того же слота «выхода» ФТО, которые передаются в решатель задач ТМ. Если по полученным данным

выявляется недопустимое отклонение между значениями одного или нескольких размеров, то принимается решение либо о необходимости повторного выполнения выбранной на текущем шаге ТО с учетом изменившихся условий, величины различия и заданного припуска на шлифование, либо о необходимости выполнения другой ТО, позволяющей устранить выявленное отклонение.

Рассмотрим принципы построения процедур вывода решений для автоматического синтеза ТМ механической обработки заготовок для получения из них готовых деталей.

Процедуры вывода решений в процессе автоматического синтеза ТМ

В общем случае автоматический синтез ТМ, обеспечивающего требуемую механическую обработку заготовок, связан с решением следующих основных задач в приведенной ниже последовательности.

1. Выполнить анализ поступивших на вход ГАТЛ заготовок $s_i \in S$ и соответствующих им готовых деталей $s_i^* \in S^*$ для выделения обрабатываемых поверхностей и построения их формального описания в виде семантических сетей $G_i = (v_j, V_b, E_i)$ и $G_i^* = (v_j, V_b^*, E_i^*)$, где v_j — базовая вершина или идентификатор, определяющий j -й подкласс, к которому относится, например, соответствующая заготовкам семантическая сеть G_i .

2. Определить подкласс, к которому относятся изготавливаемые детали и используемые для этого заготовки.

3. Отнести к обрабатываемым на заготовках $s_i \in S_j$ поверхностям такие поверхности, у которых имеются различия с одноименными им поверхностями готовых деталей $s_i^* \in S^*$. Для этого проводится сравнение пометок одноименных вершин в семантических сетях $G_i = (v_j, V_b, E_i)$ и $G_i^* = (v_j, V_b^*, E_i^*)$.

4. Провести выборку из базы знаний ФР на основе установленных между заготовками и изготавливаемыми деталями различий.

5. Для каждой обрабатываемой поверхности в заготовке выявить и выбрать из базы знаний ФТО, необходимые для устранения различий. Выбор основывается на ФР, выявленных на предыдущем шаге.

6. Установить порядок обработки поверхностей в заготовках для изготовления готовых деталей на основе следующих общепринятых для механической обработки правил [10]:

- поверхности, на которых можно ожидать появление брака из-за скрытых дефектов металла (трещин, раковин, волосовин и т. п.), то есть поверхности с большой площадью, требующие для обработки снятия металла;
- базовые для дальнейшей обработки поверхности;
- поверхности с наибольшим припуском;
- поверхности, снятие металла с которых в наименьшей степени влияет на жесткость заготовки;
- все оставшиеся поверхности, ранжируются по точности обработки, согласно условию, что в по-

следнюю очередь обрабатывается поверхность, имеющая максимальную точность.

7. На основе имеющихся в решателе задач эвристических правил для каждой поверхности заготовок $s_i \in S_j$ устанавливается порядок устранения их различий с одноименными поверхностями изготавливаемых деталей $s_i^* \in S^*$. Например, следующих эвристических правил:

— «Первыми выполняются ТО, выявленные по различиям, устранение которых требует снятия наибольшего слоя металла с максимальной по площади поверхности»,

— «Строгальные операции выполняются после реализации токарных операций»,

— «Различия в виде отверстий устраняются на поверхности в последнюю очередь» и т. д.

8. Согласно построенному в п. 5 порядку обработки поверхностей в заготовках $s_i \in S_j$ и сформированном в п. 7 для их обработки цепочкам ТО, сформировать общий ТМ механической обработки заготовок.

9. Сгруппировать одноименные ТО в разработанном ТМ, относящиеся к различным обрабатываемым поверхностям заготовок для их обработки без перехода к другому виду операций.

Таким образом, для разработки процедур вывода решений в процессе автоматического проектирования ТМ на основе предложенной модели представления знаний необходимо синтезировать инструментальные средства, обеспечивающие эффективное решение перечисленных выше подзадач. В работе предлагается реализовать данные инструментальные средства с учетом следующих положений.

1. Первая подзадача относится к самостоятельным задачам распознавания образов, и ее решение в настоящей работе не рассматривается. Тогда полагаем, что на вход интеллектуального решателя задач ТМ от информационно-измерительной системы поступает формальное описание заготовок $s_i \in S_j$ и готовых деталей $s_i^* \in S^*$ в виде семантических сетей $G_i = (v_j, V_b, E_i)$ и $G_i^* = (v_j, V_b^*, E_i^*)$ соответственно.

2. Определение подкласса j , к которому относятся поступившие на вход заготовки $s_i \in S_j$, осуществляется по подклассу, к которому относятся изготавливаемые из них детали. Например, подкласс «многоступенчатые валы» $s_i^* \in S^*$ определяется на основе следующего параметрического соотношения:

$$s_j^* \rightarrow \begin{cases} j = 1, & \text{если } (d_{11} \leq d_j^* < d_{12}) \otimes (h_{11} \leq h_j^* < h_{12}), \\ j = 2, & \text{если } (d_{12} \leq d_j^* < d_{13}) \otimes (h_{12} \leq h_j^* < h_{13}), \\ & \vdots \\ j = 5, & \text{если } (d_{15} \leq d_j^* < d_{16}) \otimes (h_{15} \leq h_j^* < h_{16}), \end{cases}$$

где d_{jz}, d_{jz+1} — нижняя и верхняя граничные оценки цилиндрической поверхности, имеющей максимальный диаметр в многоступенчатых валах, относящихся к j -му подклассу; d_j^*, h_j^* — габаритные размеры анализируемого многоступенчатого вала; \otimes — операция, означающая необходимость одновременного выполнения правой

и левой части проверяемого условия; h_{jz}, h_{jz+1} — нижняя и верхняя граничные оценки длины многоступенчатых валов, относящихся к j -му подклассу.

Отметим, что если на ГАТЛ изготавливаются многоступенчатые валы, для которых не выполняется ни одно из условий параметрического соотношения, то они относятся к комбинированному подклассу, например, по максимальному диаметру поверхности к подклассу $j = 1$, а по длине — к подклассу $j = 2$ и т. д. В этом случае для автоматического построения ТМ используются типовые элементы представления процедурных знаний, относящиеся к первому и второму классу изготавливаемых деталей.

3. С целью выявления обрабатываемых в заготовках поверхностей выполняется сравнение пометок одноименных вершин $v_k \in V_i$ и $v_k^* \in V_i^*$ в семантических сетях G_i и G_i^* , соответственно относящихся к заготовкам $s_i \in S_j$ и готовым деталям $s_i^* \in S_j^*$. По результатам такого сравнения k -я поверхность заготовки, определяемая вершиной $v_k \in V_i$ относится к числу обрабатываемых, если у нее имеются различия с одноименной с ней поверхностью в готовой детали, определяемой вершиной $v_k^* \in V_i^*$. При этом такие различия могут быть следующих двух видов:

— множество различий V_p по значениям одноименных у сравниваемых поверхностей размеров, например, различие $v_\delta \in V_p, \delta = \overline{1, n_\delta}$ по величине диаметра у цилиндрической поверхности заготовки, который, как правило, может быть больше, чем диаметр этой же поверхности у готовой детали и т. п.;

— множество различий V_p^* , определяемых наличием на поверхностях у готовых деталей механически проведенных изменений, например, на цилиндрической поверхности имеется плоскость, на которой просверлено отверстие и т. п. Множество V_p данного вида различий между готовыми деталями и заготовками определяется на основе разности $V_p = V_i^*/V_i$ множеств вершин V_i^* и V_i , соответственно относящихся к семантическим сетям G_i и G_i^* .

4. На основе наименования выявленных различий V_{kp} и V_{kp}^* между одноименными поверхностями заготовок $v_k \in V_i$ и готовых деталей $v_k^* \in V_i^*$, а также в соответствии с классом и подклассом, к которым они относятся, для каждого установленного в п. 3 различия по соответствующему ему идентификатору определяются все необходимые для автоматического синтеза ТМ фреймы $\Phi P_{\delta k}$, $\delta = \overline{1, n_{\delta k}}$, где $n_{\delta k}$ — число различий между k -ми одноименными поверхностями в заготовках и готовых деталях.

5. По найденным фреймам различий для каждой обрабатываемой поверхности в заготовке $s_i \in S_j$ определяются типовые фреймы $\Phi P_{\delta k}$, позволяющие установить ТО, выполнение которых обеспечивает устранение выявленных различий V_{kp} и V_{kp}^* .

6. Для построения порядка обработки поверхностей $v_k \in V_i$ в заготовках $s_i \in S_j$ на основе их геометрических размеров и выбранных для каждой из них фреймов $\Phi P_{\delta k}$, определяющих необходимые для их обработки ТО, вначале ранжируются все поверхности, предусматривающие сьем металла с поверхности

в порядке снижения их площади. Затем в полученном таким образом кортеже выполняются перестановки его элементов в следующем порядке:

1) справа налево, согласно соответствующим характеристикам по признаку «базовая для дальнейшей обработки поверхность (имеющая механического вида различия) с учетом роста площади обработки»;

2) справа налево по признаку «базовая для дальнейшей обработки поверхность, рост площади обработки и рост необходимого припуска»;

3) слева направо по признаку «максимальная точность, базовая для дальнейшей обработки поверхность, в порядке снижения площади обработки и необходимого припуска для их шлифовки».

7. Для решения поставленной в данном пункте подзадачи следует исходить из того, что для каждого класса готовых деталей $s_i^* \in S_j^*$ формируются эвристические правила, позволяющие установить порядок выполнения ТО, связанных с их изготовлением из различных заготовок $s_i \in S_j$. Например, для ступенчатых валов может быть установлен следующий порядок выполнения операций.

Первую позицию в формируемом порядке занимает ТО, позволяющая устранить различие между обрабатываемой поверхностью в заготовке $v_k \in V_i$ и одноименной с ней поверхностью в готовой детали $v_k^* \in V_i^*$ путем снятия самого толстого слоя металла со всей ее площади. Например, как правило, при изготовлении многоступенчатых валов к таким операциям относится токарная обработка цилиндрических поверхностей заготовок.

Затем выполняются строгальные операции, если необходимо, согласно имеющимся различиям между одноименными поверхностями заготовок и готовых деталей, получить плоскую поверхность, например, на цилиндрической поверхности изготавливаемого вала. После этого реализуются фрезерные операции, например, если какие-либо поверхности готовой детали имеют шлицы. И наконец, в последнюю очередь выполняются операции сверления при наличии отверстий у поверхностей готовых деталей в отличие от одноименных с ними поверхностями заготовок. Затем с учетом имеющихся припусков выполняются операции шлифования различных поверхностей, если этого требует качество изготавливаемых деталей.

К более точному и универсальному, но и более трудоемкому способу автоматического построения порядка выполнения ТО в процессе обработки поверхностей $v_k \in V_i$ у различного класса заготовок по готовым деталям следует отнести следующий способ. Первой выполняется ТО, найденная по ФТО, у которого «вход» совпадает с формальным описанием исходного состояния обрабатываемой поверхности $v_k \in V_i$ в заготовке $s_i \in S_j$. Следующей реализуется ТО, выявленная по ФТО, у которого «вход» совпадает со значением «выход» фрейма, выбранного на предыдущем шаге построения порядка выполнения операций. Процесс конкатенации ФТО продолжается до тех пор, пока не будет выявлен фрейм,

у которого «выход» совпадает с формальным описанием данной поверхности $v_k^* \in V_i^*$ в готовых деталях $s_i^* \in S^*$.

Следует заметить, что важным достоинством данного способа автоматического проектирования ТМ в пространстве подзадач является то, что на его основе можно сформировать дерево альтернативных ТМ, позволяющее определять наиболее эффективный из них по заданным критериям оптимальности. Например, ТМ обеспечивающий обработку различных заготовок с минимальными затратами.

8. Согласно выявленному в п. 6 порядку обработки поверхностей в заготовках $s_i \in S_j$ и на основе построенных по процедурам п. 7 цепочек ТО для их обработки, тривиально формируется структура всего ТМ.

9. Для каждого вида операций в ТМ справа от их позиции, на которой они впервые встречаются в сформированном маршруте, приписываются одноименные с ними операции, относящиеся к различным обрабатываемым поверхностям заготовок. Это позволяет выполнять отработку всех одноименных в ТМ операций без перехода к другому виду ТО.

Следует отметить, что контроль над качеством процесса обработки заготовок выполняется после реализации каждой ТО сформированного ТМ по ранее описанному принципу на основе анализа отклонений между фактическим и требуемым значением полученного на ее основе результата.

Пример решения задачи

Для проверки работоспособности предложенных процедур автоматического проектирования ТМ в процессе производства деталей рассмотрим решение задачи изготовления из цельного круглого проката двухступенчатого вала (рис. 1).

Согласно принятой в ИСУАП ТМ отчетности: слева — направо, сверху — вниз, заготовка и изготавливаемая деталь имеют две основные поверхности, которые нумеруются цифрами 1 и 2.

Допустим, что поверхности в заготовке характеризуются следующими размерами:
— поверхность 1 — цилиндр (диаметр $d_1 = 108$ мм, длина $h_1 = 151$ мм);
— поверхность 2 — цилиндр (диаметр $d_2 = 108$ мм, длина $h_2 = 31$ мм).

Изготавливаемый из заготовки двухступенчатый вал имеет следующие размеры и параметры обработки:

— поверхность 1-цилиндр (диаметр $d_{1д} = 105$ мм, длина $h_{1д} = 120$ мм, точность обработки 0,15 мм, чистота обработки $\nabla 4$);
— поверхность 2 — цилиндр (диаметр $d_{2д} = 50$ мм, длина $h_{2д} = 30$ мм, точность обработки 0,15 мм, чистота обработки $\nabla 4$).

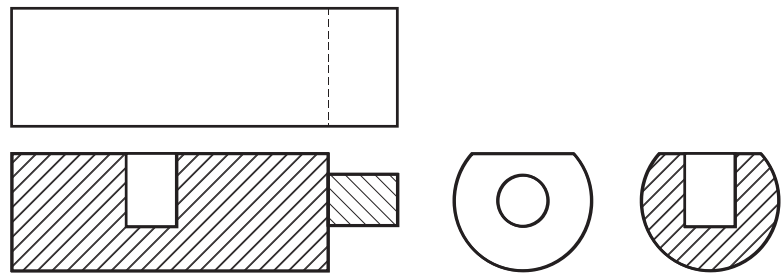


Рис. 1. Внешний вид заготовки и изготавливаемого из нее двухступенчатого вала. Здесь пунктиром показано условное разделение цилиндрической поверхности заготовки (круглого проката) на две поверхности, обрабатываемые в соответствии с отдельными технологическими операциями

Кроме того, на поверхности 1 готовой детали имеется плоская поверхность, характеризующаяся следующими размерами и параметрами обработки (длина $h_{зд} = 130$ мм, ширина $L_{1д} = 10$ мм, точность обработки 0,15 мм, чистота обработки $\nabla 4$), в центре которой просверлено отверстие (диаметр $d_{зд} = 10$ мм, глубина $l_{1д} = 20$ мм, точность обработки 0,01 мм, чистота обработки $\nabla 4$).

Требуется автоматически построить ТМ изготовления заданного двухступенчатого вала из имеющейся для этого заготовки.

1. Создается формальное описание заготовки и вала в виде семантических сетей (рис. 2 и 3). Отметим, что в семантической сети, описывающей изготавливаемую деталь, чтобы не загромождать рисунок, опущены параметры обработки поверхностей 1 и 2 (точность и чистота их обработки), так как их значения не влияют на ход решения поставленной задачи.

2. Определяется подкласс деталей, к которым относится изготавливаемый двухступенчатый вал. Пусть ГАТЛ предусматривает изготовление пяти подклассов многоступенчатых валов, определяющихся следующими интервальными значениями габаритных размеров, мм: <очень малые: $d_1 \in [50, 200]$, $h_1 \in$

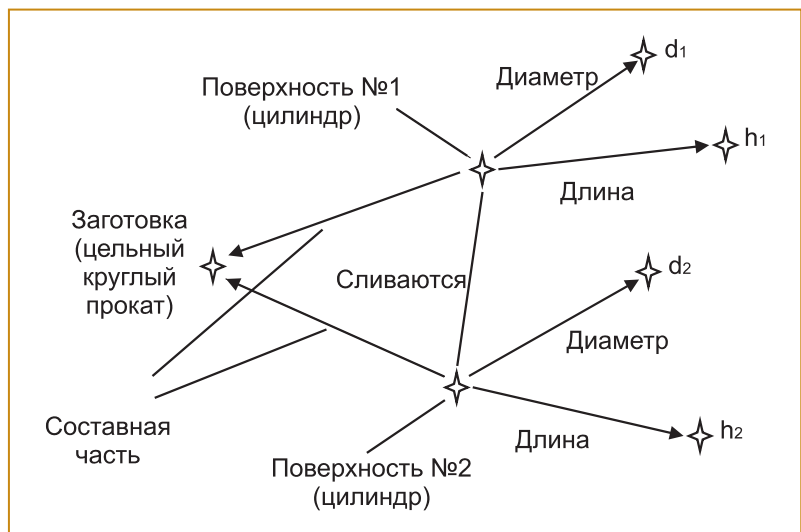


Рис. 2. Семантическая сеть, описывающая заготовку

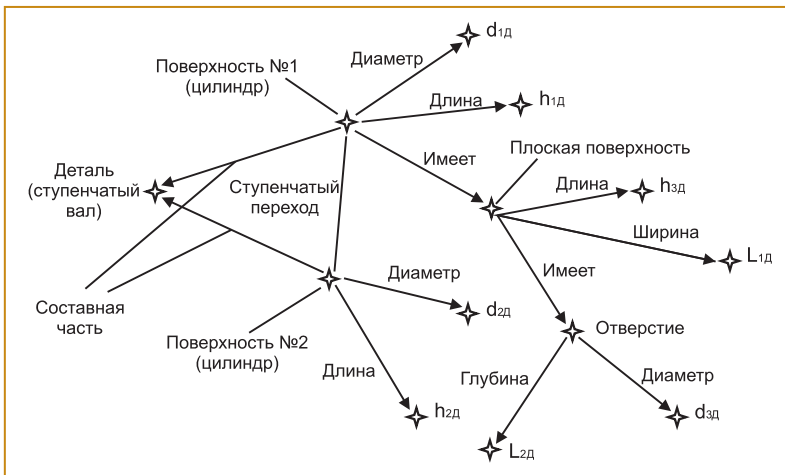


Рис. 3. Семантическая сеть, описывающая двухступенчатый вал

[100, 300]>; <малые: $d_2 \in [200, 250]$, $h_2 \in [300, 350]$ >; <средние: $d_3 \in [250, 300]$, $h_3 \in [350, 400]$ >; <большие: $d_4 \in [300, 350]$, $h_4 \in [400, 450]$ > и <очень большие: $d_5 \in [350, 400]$, $h_5 \in [450, 500]$ >.

Изготавливаемый двухступенчатый вал имеет следующие габаритные размеры: диаметр $d_{ГД} = 105$ мм, длина $h_{ГД} = 150$ мм, тогда, согласно параметрическому соотношению, он относится к подклассу «очень малые детали». Следует отметить, что в процессе решения поставленной задачи не рассматриваются вопросы, связанные с проектированием ТО, так как они не относятся к проблеме, исследуемой в настоящей работе.

3. Выявляются обрабатываемые в заготовке поверхности и имеющиеся у данных поверхностей различия с одноименными поверхностями изготавливаемого двухступенчатого вала. Для этого на первом этапе в построенных для обрабатываемой заготовки и изготавливаемой детали семантических сетях $G_i = (v_j, V_i, E_i)$ и $G^*_i = (v_j, V^*_i, E^*_i)$ сравниваются значения пометок одноименных вершин.

В рассматриваемом примере имеются следующие различия данного вида:

— $d_1 > d_{1д}$. Величина этого различия $\Delta d_1 = d_1 - d_{1д}$, площадь поверхности различия равна P_1 ;

— $d_2 > d_{2д}$. Величина этого различия $\Delta d_2 = d_2 - d_{2д}$, площадь поверхности различия равна P_2 .

На втором этапе выявляются различия по вершинам в семантической сети, описывающей деталь, которые отсутствуют в семантической сети, определяющей заготовку. Для этого формируется семантическая сеть $\Delta G_i = (\Delta V_i, \Delta E_i)$, у которой множество вершин ΔV_i и ребер ΔE_i определяется с помощью теоретико-множественной разности между множествами вершин V^*_i, V_i и множествами ребер E_i, E^*_i , то есть $\Delta V_i = V^*_i / V_i$, $\Delta E = E^*_i / E_i$.

Затем проводится анализ вершин полученной сети $\Delta G_i = (\Delta V_i, \Delta E_i)$, по результатам которого устанавливаются различия следующего вида:

— первая поверхность изготавливаемой детали имеет различие с одноименной с ней поверхностью

в заготовке, в форме плоской поверхности с размерами: длина $h_{3д}$, ширина $L_{1д}$;

— вторая поверхность изготавливаемой детали имеет различие с одноименной с ней поверхностью в заготовке, в виде отверстия с размерами (диаметр $d_{3д}$, ширина $L_{2д}$).

4. Из базы знаний выбираются и заносятся в решатель задач ИСУАП ТМ на основании различий, выявленных на предыдущем шаге, следующие ФР:

— $\Phi P_1 = \langle \text{Диаметр цилиндрической поверхности 1} \rangle \langle \text{Параметры различия } \Delta d_1 \rangle \langle \text{Токарная обработка (параметры ТО)} \rangle$;

— $\Phi P_2 = \langle \text{Диаметр цилиндрической поверхности 2} \rangle \langle \text{Параметры различия } \Delta d_2 \rangle \langle \text{Токарная обработка (параметры ТО)} \rangle$;

— $\Phi P_3 = \langle \text{Плоскость у детали на цилиндрической поверхности 1} \rangle \langle \text{Параметры различия (длина } h_{3д}, \text{ ширина } L_{1д}) \rangle \langle \text{Строгание поверхности (параметры ТО)} \rangle$;

— $\Phi P_4 = \langle \text{Отверстие на плоскости цилиндрической поверхности 1 у детали} \rangle \langle \text{Параметры различия (диаметр } d_{3д}, \text{ глубина } L_{2д}) \rangle \langle \text{Сверление отверстия (параметры ТО)} \rangle$.

5. Из базы знаний выбираются и заносятся в решатель задач ТМ по найденным на предыдущем шаге ФР следующие фреймы ТО, по которым определяются операции, необходимые для обработки заготовки для изготовления на ГАТЛ заданного двухступенчатого вала:

$\Phi T O_1 = \langle \langle \text{Токарная обработка поверхности 1} \rangle \langle \text{Формальное описание необходимого для выполнения ТО состояния поверхности 1} \rangle \langle \text{Съем металла с поверхности 1 — токарная операция (ТКО}_1) \rangle \langle \text{Режимы и условия выполнения ТКО}_1 \rangle \langle \text{Формальное описание поверхности 1 после выполнения ТКО}_1 \rangle \rangle$;

$\Phi T O_2 = \langle \langle \text{Токарная обработка поверхности 2} \rangle \langle \text{Формальное описание необходимого для выполнения ТО состояния поверхности 2} \rangle \langle \text{Съем металла с поверхности 2 — токарная операция (ТКО}_2) \rangle \langle \text{Режимы и условия выполнения ТКО}_2 \rangle \langle \text{Формальное описание поверхности 2 после выполнения ТКО}_2 \rangle \rangle$;

$\Phi T O_3 = \langle \langle \text{Строгание поверхности 1} \rangle \langle \text{Формальное описание необходимого для выполнения ТО состояния поверхности 1} \rangle \langle \text{Съем металла с поверхности 1 — строгальная операция (СО}_1) \rangle \langle \text{Режимы и условия выполнения СО}_1 \rangle \langle \text{Формальное описание поверхности 1 после выполнения СО}_1 \rangle \rangle$;

$\Phi T O_4 = \langle \langle \text{Сверление} \rangle \langle \text{Формальное описание необходимого для выполнения ТО состояния поверхности 1} \rangle \langle \text{Сверление отверстия на поверхности 1 — операция сверления (ОС}_1) \rangle \langle \text{Режимы и условия выполнения ОС}_1 \rangle \langle \text{Формальное описание поверхности 1 после выполнения ОС}_1 \rangle \rangle$.

Отметим, что режимы и условия всех ТО, найденных по ФТО, определяются по параметрам устраняемых на их основе различий приведенных в биективно соответствующих им ФР.

6. Определяется порядок обработки поверхностей в имеющейся заготовке на основе анализа характера выполняемых над ними ТО. Формируется кортеж <поверхность 2, поверхность 1> по объему снимаемого с этих поверхностей металла. Затем по признаку «базовая для дальнейшей обработки поверхность» в полученном кортеже поверхность 1 переходит на первую позицию. Больше перестановки элементов в полученном на втором этапе кортеже не выполняются, так как обе поверхности имеют одинаковые остальные характеристики.

7. Решателем задач устанавливается порядок выполнения ТО в проектируемом ТМ. Для этого используются эвристические правила его построения при изготовлении многоступенчатых валов. Для первой поверхности заготовки устанавливается следующий порядок ее обработки <ТКО₁, СО₁, ОС₁>. Для обработки второй поверхности заготовки выполняется только одна ТО ТКО₂.

8. Согласно выявленному в п. 6 порядку обработки поверхностей в заготовке и на основе построенных в п. 7 цепочек ТО для изготовления заданного двухступенчатого вала, формируется следующий ТМ механической обработки исходной заготовки: <ТКО₁, СО₁, ОС₁ ТКО₂>.

9. В полученном на предыдущем шаге ТМ выполняется перестановка ТО ТКО₂ с последней на вторую позицию с целью выполнения имеющихся в построенном ТМ одноименных операций без перехода к другим ТО. В результате получается окончательный ТМ механической обработки заготовки для изготовления из нее двухступенчатого вала: <ТКО₁, ТКО₂, СО₁, ОС₁>.

Заключение

1. Предложенный в работе подход обеспечивает возможность создания ИСУАП ТМ сложных технологических процессов механической обработки заготовок для изготовления из них различных деталей.

2. Разработанное представление декларативных знаний интеллектуального решателя задач позволяет создавать формальные модели описания обрабатываемых заготовок и изготавливаемых из них деталей, обеспечивающие определение имеющихся между ними различий, и осуществлять автоматический выбор необходимых для их устранения ТО.

3. Предложенная модель представления процедурных знаний ИСУАП ТМ позволяет упорядочить последовательность обработки различных поверхностей заготовок и реализуемых ТО и, таким образом,

автоматически спроектировать необходимый ТМ для изготовления заданных деталей.

4. Разработанные процедуры обработки знаний обеспечивают возможность эффективным образом автоматически строить ТМ сложных технологических процессов механической обработки и на этой основе автоматизировать процесс их проектирования.

5. Дальнейшее развитие предложенного подхода, связанного с построением ИСУАП технологических процессов, заключается в разработке процедур автоматического синтеза ТО на основе анализа, вида и характеристик различий между обрабатываемыми поверхностями заготовок и одноименными с ними поверхностями готовых деталей.

Список литературы

1. Боровков А.И., Лагашев В.Г. Технологические основы гибких автоматических производств. Л.: Машиностроение. 1985. 176 с.
2. Кудряшов Е.И., Емельянов С.Г., Яцук Е.Н., Павлов Е.В. Материалы и технологические процессы машиностроительных производств. М.: Альфа-М, НИЦ ИНФРА-М. 2012. 256 с.
3. Бернер Э.М., Таратынов О.В. САПР технолога машиностроителя. М.: ИНФРА-М. Форум. 2015. 288 с.
4. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. М.: Академия, 2007. 272 с.
5. Кравцова М. Проектирование технологических процессов машиностроительных производств. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
6. Königseder C., Shea K. Comparing Strategies for Topologic and Parametric Rule Application in Automated Computational Design Synthesis // Journal of Mechanical Design. 138(1), 2015.
7. Lucas Cordeiro. Automated Verification and Synthesis of Embedded Systems using Machine Learning. <https://www.researchgate.net/publication/314092003/download>
8. Alex Burnap, Ye Liu, Yanxin Pan, Honglak Lee, Richard Gonzalez and Panos Y. Papalambros. Estimating and exploring the product form design space using deep generative models // Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2016. USA.
9. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. М.: Вильямс, 2006. 1408 с.
10. Капустин Н.М. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. М.: Высшая школа, 2012. 415 с.

Мелехин Владимир Борисович — д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем

*ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»,
Хачумов Вячеслав Михайлович — д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН, зав. лабораторией
Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН.
E-mail: pashka1602@mail.ru vmh48@mail.ru*