

Технология и технологические машины

УДК 621.9.02—229

Формирование рациональной структуры маршрутных процессов изготовления деталей машин

А.И. Кондаков

Проблема синтеза структур маршрутных технологических процессов в настоящее время методологически не решена. Ее важнейшим аспектом является определение уровня концентрации технологических переходов в операциях, особенно выполняемых на современных многоцелевых станках с ЧПУ. В данном исследовании предложен подход для обоснованного определения указанного уровня. Впервые показана возможность существенного сокращения трудоемкости технологического проектирования путем предварительного подбора номенклатуры изготавливаемых деталей на основе количественных оценок технологического подобия. Результаты исследования будут полезны при разработке эффективной методологии синтеза, в том числе автоматизированного формирования маршрутных процессов изготовления деталей машин.

Ключевые слова: маршрутный процесс, технология, деталь, структура, проектирование, формирование.

Forming rational route sheets for manufacturing machine parts

A.I. Kondakov

Routing is the basic design decision in the preproduction of machine parts. The routing algorithm synthesis problem has not been methodologically resolved yet. The most important aspect of this problem is to determine the number of manufacturing steps, especially for procedures performed on modern numeri-



КОНДАКОВ
Александр Иванович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KONDAKOV
Aleksandr Ivanovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

cally controlled machining centers. In this study, an approach for determining the sound number of manufacturing steps is suggested. The possibility of a significant reduction in complexity of the design process by preselecting the nomenclature of manufactured parts is first proved. The proposed approach is based on the quantitative assessments of technological similarity. The results of research will be useful for developing effective synthesis methodologies including automated routing algorithms for manufacturing machine parts.

Keywords: routing, technology, machine part, structure, design, formation.

Маршрутный технологический процесс (МТП) изготовления — основное решение, формируемое и принимаемое при технологической подготовке производства изделия (детали). Он определяет практически все решения, принимаемые впоследствии (разработка операционной технологии, выбор или проектирование средств технологического оснащения и др.).

По сути МТП изготовления детали — целенаправленная система, состав которой определен списком входящих в него технологических операций, а структура — последовательностью (порядком) их выполнения. Маршрутный технологический процесс представляет собой упорядоченную последовательность технологических операций, преобразующих производственно-технологические показатели качества исходной заготовки в показатели качества готовой детали. МТП изготовления детали — система линейной структуры: каждая последующая операция выполняется лишь после завершения предыдущей. Положение каждой операции в структуре процесса строго фиксировано.

Построение структуры МТП (синтез структуры) вызывает наибольшие затруднения при их проектировании. Практически для любой детали уже на начальном этапе проектирования МТП может быть определено ограниченное множество технологических методов ее изготовления. Однако установление последовательности их применения, объединение их в будущие (пока еще не сформированные) операции, установление порядка этих операций, определение содержания первой из выполняе-

мых технологических операций и др. в ряде случаев вызывает серьезные затруднения, что сказывается на трудоемкости изготовления детали, производственных затратах и качестве технологического проектирования в целом. Методические основы формирования МТП, в том числе автоматизированного, в настоящее время разработаны недостаточно, что ведет к субъективизму в принятии этого важнейшего решения, его недостаточной эффективности при реализации и низким технико-экономическим показателям производства.

Проблема автоматизированного синтеза структур МТП изготовления деталей в настоящее время не решена. Полноценные автоматизированные системы, обеспечивающие генеративный синтез единичных МТП на основании вводимых конструктивно-технологических параметров исходной заготовки и готовой детали, отсутствуют. Между тем, именно потребность в создании таких систем стала одной из важнейших причин появления самостоятельной научной дисциплины — теории автоматизированного проектирования технологических процессов.

Роль структурного фактора при формировании МТП исключительно велика: для одного и того же множества необходимых для изготовления детали технологических методов может быть сформировано несколько вариантов единичных МТП, существенно отличающихся по структуре и обеспечиваемым технико-экономическим показателям. Вариативность МТП может играть как положительную роль, позволяя выбрать наилучший с точки зрения разработчика вариант (в особенности, если существуют средства генерации вариантов МТП или облегчающие это), так и неоправданно увеличивать трудоемкость технологического проектирования. Математический аппарат структурной оптимизации МТП практически отсутствует. В реальных условиях проектирования оптимизацию МТП обычно не выполняют, рассматривая и совершенствуя его единственный вариант, перспективный по мнению разработчика.

Недостатки методологии проектирования МТП изготовления деталей в производстве (в том числе и в промышленно развитых стра-

нах) стараются компенсировать доводкой МТП в производственных условиях при изготовлении установочных партий изделий или в опытном производстве. Это существенно удорожает процесс изготовления и снижает производственные показатели. Вместе с тем наличие опытного производства следует считать необходимым условием выпуска конкурентоспособной продукции.

При невозможности оптимизации структуры МТП в соответствии с процедурой ее выполнения любое усовершенствование структуры с точки зрения отдельных (частных) критериев позволяет считать его повышением уровня ее рациональности, определяемым характером указанных критериев. Рациональная структура МТП изготовления детали может способствовать обеспечению:

- качества ее изготовления;
- эффективному взаимодействию в едином процессе технологических методов разной физической природы, определяющему его стабильность;
- достаточной производительности процесса изготовления;
- минимальных затрат на изготовление и рациональному расходованию производственных ресурсов.

Рациональный метод формирования структуры МТП способствует снижению трудоемкости его проектирования.

Структура МТП зависит от выбранного уровня концентрации переходов в его операциях, соответствующего базовому принципу его построения. Высококонтрированные операции соответствуют единичному и мелкосерийному типам производств. Современное автоматизированное оборудование с ЧПУ (например, многоцелевые станки) позволяет создавать высококонтрированные операции, обеспечивая заданное качество изготовления деталей за меньшее число операций. Вместе с тем введение в МТП таких операций обязательно должно быть обосновано экономически, что неоднократно ([1] и др.) пытались объединить с методическими основами их построения.

Пусть для изготовления детали ранее был разработан МТП № 1, содержащий I техноло-

гических операций. Суммарные приведенные затраты Z_{n1} на его реализацию составят

$$Z_{n1} = \sum_{i=1}^{i=I} Z_i, \quad (1)$$

где Z_i — приведенные затраты на выполнение i -й операции МТП № 1, $i = 1, \dots, I$,

$$Z_i = C_i + EK_i. \quad (2)$$

Здесь C_i — себестоимость (переменная часть приведенных затрат) для i -й операции; K_i — капиталовложения, необходимые для выполнения i -й операции; E — коэффициент относительной эффективности капиталовложений. Выделив в МТП № 1 некоторую операцию L , можно записать

$$Z_{n1} = \sum_{i=1}^{i=L-1} Z_i + Z_L + \sum_{i=L+1}^{i=I} Z_i. \quad (3)$$

Пусть выполнение L -й операции решено перевести, например, на многоцелевой станок с ЧПУ, позволяющий не только выполнить ее, но и реализовать все операции $i = L+1, \dots, I$ на одном (L -м) рабочем месте. При этом МТП № 1 преобразуется в иной — МТП № 2, затраты на выполнение которого (Z_{n2}) можно определить по формуле

$$Z_{n2} = \sum_{i=1}^{i=L-1} Z_i + Z_{L2}, \quad (4)$$

где Z_{L2} — затраты на выполнение L -й операции в МТП № 2. Очевидно, что

$$Z_{L2} = kZ_L, \quad (5)$$

где $k > 1$ — коэффициент увеличения приведенных затрат на выполнение концентрированной L -й операции в МТП № 2. Разница приведенных затрат, обусловленная изменением МТП (ΔZ_n), рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} \Delta Z_n &= Z_{n1} - Z_{n2} = Z_L + \sum_{i=L+1}^{i=I} Z_i - Z_{L2} = \\ &= Z_L + \sum_{i=L+1}^{i=I} Z_i - kZ_L. \end{aligned} \quad (6)$$

Желательно, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\Delta Z_{\text{п}} > 0; \tag{7}$$

$$Z_L(1-k) + \sum_{i=L+1}^{i=J} Z_i > 0,$$

$$\sum_{i=L+1}^{i=J} Z_i > (k-1)Z_L, \tag{8}$$

$$\frac{\sum_{i=L+1}^{i=J} Z_i}{Z_L} > (k-1).$$

Условие (8) — условие экономической эффективности использования концентрированной операции и рациональности структуры МТП № 2. Оно же определяет и возможность использования операций, в которых обеспечивается «достижимое» качество изготовления, в процессах, содержащих в основной операции, обеспечивающие «экономическое» качество [2]. Аналогичным образом может быть оценено изменение производительности при переходе на изготовление детали по МТП № 2.

При использовании интегрального критерия качества спроектированного МТП K_j возможна оценка эффективности предполагаемого технологического решения. В частности,

$$K_j = \frac{Q_j}{Z_{\text{п}j}}, \tag{9}$$

где Q_j — производительность j -го МТП; $Z_{\text{п}j}$ — приведенные затраты на реализацию j -го МТП. Более эффективному решению соответствует большее значение K_j . Для сравниваемых МТП относительная оценка эффективности имеет вид

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{Q_1 Z_{\text{п}2}}{Z_{\text{п}1} Q_2}. \tag{10}$$

При $K_1/K_2 < 1$ МТП № 2 в целом следует считать более эффективным, чем МТП № 1, а применение в нем концентрированной операции является целесообразным и обоснованным. Процесс изготовления деталей в мелкосерийном производстве может содержать не одну, а несколько высококонцентрированных операций или вообще полностью состоять из таких операций. Однако в любом случае его реализа-

ции должен предшествовать тщательный технико-экономический анализ.

Формирование МТП при подготовке современного многономенклатурного производства чаще всего выполняют на основе МТП-аналогов. Поиск процесса-аналога обычно ведут путем неавтоматизированного сравнения конструктивно-технологических признаков изготавливаемой детали с признаками деталей-представителей, хранящимися в соответствующей базе данных. Процесс изготовления (обычно в маршрутно-операционном изложении) наиболее близкой по указанным признакам детали-представителя принимают за процесс-аналог. Его корректируют как по составу, так и по структуре, добавляя необходимые и исключая ненужные технологические операции.

В современных производственных системах подбор номенклатуры деталей, предназначенных для изготовления, с использованием объективных, формально оцениваемых показателей, чаще всего не выполняют. Ограничиваются визуальным сходством предназначенной для изготовления детали с уже изготавливаемыми, ориентируясь на специализацию (предметную или технологическую) производственной системы и сложившуюся на производстве ситуацию.

Использование современных математических методов, например, кластерного анализа [3], не позволило получить пригодные для практического использования алгоритмы селекции номенклатуры деталей.

Пусть a — число операций в найденном МТП-аналоге, b — число операций в единичном МТП, сформированном на его основе. Для определенности $a > b$. Трудоемкость формирования решения T_6 , связанного с проектированием единичного МТП без предварительного подбора номенклатуры, приближенно можно оценить по формуле

$$T_6 = bt_{\text{п.о}} + \alpha bt_k, \tag{11}$$

где $t_{\text{п.о}}$ — время поиска и определения основного содержания одной операции по процессу-аналогу; t_k — среднее время корректировки одной операции процесса-аналога; α — средняя характеристика объема корректировки процесса-аналога, на практике $\alpha = 0,6...0,4$.

Время корректировки, представляющей собой структурно-параметрическую модификацию МТП-аналога, существенно превосходит время поиска (определения) основного содержания операции:

$$t_k > t_{п.о}; T_6 \approx \alpha b t_k. \quad (12)$$

Номенклатура деталей, изготавливаемых в производственной системе, может быть предварительно подобрана с использованием развитой системы оценок технологического подобия как по составу, так и по структуре [4, 5] и др. Значение оценки подобия S , например, состава двух сравниваемых МТП A и B можно определить по формуле

$$S = \frac{2m}{a+b}, \quad (13)$$

где a, b — число операций в сравниваемых МТП A и B соответственно; m — число пар тождественных (подобных) операций в сравниваемых процессах; $0 < S \leq 1$. При предварительном подборе номенклатуры по подобию время проектирования единичного МТП на основе аналога (T_c) можно оценить по формуле

$$T_c = m t_{п.о} + (b-m) t_k. \quad (14)$$

Выразив m из (13) и преобразовав (14), получим

$$T_c = \frac{b(2-S) - Sa}{2} t_k. \quad (15)$$

Соотношение значений T_6/T_c с учетом (11) и (15) составит

$$\frac{T_6}{T_c} = \frac{2\alpha b}{b(2-S) - Sa}. \quad (16)$$

Для среднего значения $\alpha = 0,5$

$$\frac{T_6}{T_c} = \frac{2\alpha b}{(2-S) - S \frac{a}{b}}. \quad (17)$$

Экономия времени разработки единичного МТП возможна, если

$$0 < (2-S) - S \frac{a}{b} < 1, \quad (18)$$

откуда

$$\frac{1-S}{S} < \frac{a}{b} < \frac{2-S}{S}. \quad (19)$$

Границы и область допустимых значений параметра a/b при $\alpha = 0,5$ иллюстрирует рис. 1. Принципиально возможные изменения соотношения T_6/T_c , вычисленные по (17) в зависимости от значений оценок подобия (13) и параметра a/b с ограничением (19) при $\alpha = 0,5$ показаны на рис. 2. Анализ представленных зависимостей показал возможность существенного (в разы) сокращения трудоемкости проектирования МТП за счет предварительного подбора номенклатуры деталей, изготавливаемых в производственной системе, с использованием количественных оценок их технологического подобия.

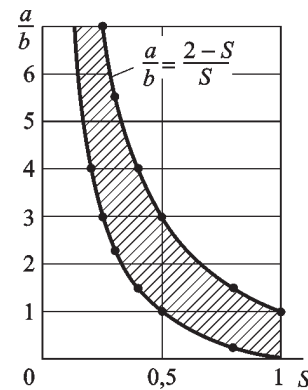


Рис. 1. Границы и область допустимых значений (заштрихована) параметра a/b при $\alpha = 0,5$

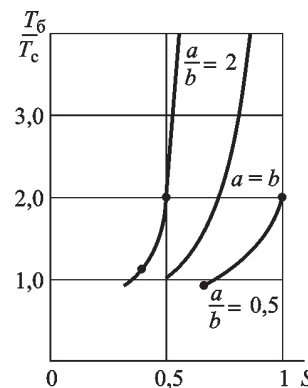


Рис. 2. Зависимость соотношения времен проектирования МТП изготовления деталей без подбора номенклатуры T_6 и с подбором номенклатуры T_c от значений оценок подобия (S) и параметра (a/b) при $\alpha = 0,5$

Выводы

1. Кардинальное совершенствование методологии технологического проектирования возможно без решения проблемы автоматизации синтеза структур маршрутных технологических процессов изготовления деталей.

2. Построение рациональных структур маршрутных технологических процессов, использующих современное оборудование с ЧПУ, требует корректного и экономически оправданного определения уровня концентрации технологических переходов в операциях, образующих их состав.

3. Трудоемкость проектирования маршрутных технологических процессов на основе процессов-аналогов может быть существенно (в разы) снижена за счет предварительного подбора номенклатуры деталей, изготавливаемых в производственной системе, с использованием количественных оценок их технологического подobia.

Литература

[1] Кондаков А.И. Формирование информационной основы проектирования маршрутных процессов изготовления деталей. *Справочник. Инженерный журнал*, 2001, № 3, с. 15 – 20.

[2] Дальский А.М., Кондаков А.И., ред. *Технология машиностроения*. В 2 т. Т. 1: *Основы технологии машиностроения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 478 с.

[3] Späth H. *Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples*, New York, Halsted Press, 1985. 217 p.

[4] Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М., Кондаков А.И. *Направленное формирование свойств изделий машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2005. 352 с.

[5] Кондаков А.И., Горлышев К.С. Экспресс-оценка возможности изготовления изделий в производственной системе фиксированной структуры. *Вестник машиностроения*, 2002, № 5, с. 53–56.

References

[1] Kondakov A.I. Formirovanie informatsionnoi osnovy proektirovaniia marshrutnykh protsessov izgotovleniia detalei [Formation of information design basis block parts manufacturing processes]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. Engineering Journal]. 2001, no. 3, pp. 15 – 20.

[2] *Tekhnologiya mashinostroeniia: v 2 t. T.1: Osnovy tekhnologii mashinostroeniia* [Engineering Technology: Vol. 1 to 2 vol. Fundamentals of Mechanical Engineering]. Ed. Dal'skii A.M., Kondakov A.I. Moscow, Bauman Press, 2011. 478 p.

[3] Späth H. *Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples*, New York, Halsted Press, 1985. 217 p.

[4] Vasil'ev A.S., Dal'skii A.M., Zolotarevskii Yu.M., Kondakov A.I. *Napravlennoe formirovanie svoistv izdelii mashinostroeniia* [Directed formation properties of engineering products]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 352 p.

[5] Kondakov A.I., Gorlyshev K.S. Ekspress-otsenka vozmozhnosti izgotovleniia izdelii v proizvodstvennoi sisteme fiksirovannoi struktury [Rapid assessment of the possibility of manufacturing products in the production system of fixed structure]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2002, no. 5, pp. 53–56.

Статья поступила в редакцию 25.11.2013

Информация об авторе

КОНДАКОВ Александр Иванович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kondakov1950@mail.ru).

Information about the author

KONDAKOV Aleksandr Ivanovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Mechanical Engineering Technology» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: kondakov1950@mail.ru).