

УДК 621.783.223:658.52.011+536.75

**Л. М. Акулович, Л. М. Кожуро, М. Л. Хейфец,
Е. З. Зевелева**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

На основании изучения рациональных маршрутов и режимов комбинированной обработки, обобщенной структурной схемы и компоновок узлов гибких производственных модулей предложена методология синтеза технологических комплексов, обеспечивающая пространственную и временную концентрацию операций.

Проектирование новых более совершенных технологических процессов, их оснащение инструментами, станками, устройствами автоматизации – сложные проблемы машиностроительного производства, имеющие различные подходы к решению и широкие диапазоны возможных альтернатив. Поэтому особенно актуален структурный синтез технологических комплексов (ТК) высокоэффективной обработки на основе параметрической оптимизации производственных модулей, реализующих ресурсосберегающие процессы [1, 2]. Для производства изделий с помощью технологических комплексов целесообразно использовать комбинированные термомеханические и электромагнитные потоки вещества и энергии, так как процессы формирования поверхностей объектов производства, вплоть до микронной точности, носят в основном термомеханический характер, электромагнитные потоки (вследствие простоты их формирования и удобства в управлении) наиболее технологичны [3].

Обобщенная структурная схема гибких производственных модулей. Гибкая высоконадежная производственная система подразделяется на: 1) исполнительные устройства (объект управления и приводы); 2) информационные устройства (датчики как внутреннего состояния системы, так и внешнего состояния среды); 3) систему управления (ЭВМ и микропроцессоры). Взаимодействие между ними осуществляется через устройства сопряжения (интерфейс) [4, 5].

Рассмотрим структуру гибкого производственного модуля (ГПМ) комбинированной электромагнитной и термомеханической обработки (КЭТО) изделий.

Для электромагнитных и термомеханических потоков [6] ГПМ конструктивно подразделяется на две структурные составляющие: электрическую и механическую части (рис. 1). Основные узлы ГПМ КЭТО соответствуют выделенным в процессе структурного синтеза ТК [7] блокам: 1) механизм крепления и движения заготовки; 2) механизм крепления и относительного перемещения инструмента; 3) механизм подачи ферропорошка и рабочей жидкости; 4) механизм крепления и относительного перемещения электромагнитного питателя и 5) источник постоянного тока.

Электрическая часть установки содержит: источник постоянного тока, в качестве которого можно использовать сварочные трансформаторы с однополупериодной схемой выпрямления или тиристорные магнитные генераторы

ры импульсного тока; магнитную систему, создающую постоянное магнитное поле в рабочей зоне, и блок управления работой электромагнитов (I); блоки относительного перемещения электромагнитного питателя (II) и автоматического регулирования рабочего зазора (III); блоки управления подачей ферропорошка (IV) и рабочей жидкости (V); блоки относительного перемещения инструмента (VI) и автоматического регулирования усилий обработки (VII); блок движения заготовки (VIII).

Механическая часть установки включает: механизмы крепления (IX) и относительного перемещения (X) электромагнитного питателя, состоящего из бункера-дозатора с механизмом вибрации, электромагнитной катушки и магнитопровода с полюсным наконечником; механизмы подачи ферропорошка (XI) и рабочей жидкости (XII) в зону обработки; механизмы крепления (XIII) и относительного перемещения (XIV) режущих и деформирующих инструментов, крепящихся в держателях, установленных на продольно-поперечном суппорте; механизмы крепления (XV) и движения (XVI) заготовки.

Сопряжения блоков электрической части с узлами механической части, управляющими обрабатываемой деталью 1, держателем с инструментом 2, бункерным дозирующим и транспортирующим устройством 3, полюсным наконечником электромагнита 4, показаны на структурной схеме ГПМ КЭТО (рис. 1). На схеме указаны места установки датчиков величин усилий обработки 5 и рабочего зазора 6, отмечено их соединение с ЭВМ через блоки автоматического регулирования (III, VII) и микропроцессоры.

Предложенная структурная схема ГПМ КЭТО содержит все необходимые составляющие мехатронной системы [4, 5]: 1) объекты управления (1-4) и приводы (IX-XVI); 2) датчики (5, 6); 3) управляющие устройства (I-VII), сопряженные между собой. Следовательно, структурная схема любого ГПМ КЭТО всегда имеет рассмотренные элементы, это позволяет модулю длительное время устойчиво работать в автономном режиме.

Для конкретных условий производства могут быть рекомендованы различные схемы компоновки блоков и узлов ГПМ, но при этом структурная схема модуля сохраняется.

Компоновка узлов гибкого производственного модуля. Рассмотрим требуемое сочетание функциональных элементов на множестве компоновок технологического комплекса.

Структурная формула компоновки состоит из трех частей: центральная – стационарный блок, левая – движение детали, правая – движение инструмента [8].

При главном вращательном движении детали для токарной компоновки (Т) структурная формула базовой системы компоновки имеет вид: $T1 - C_h 0XYZ$ – вращение детали относительно горизонтальной оси, движение инструмента поступательное относительно трех координатных осей.

При осуществлении ряда поступательных движений блоком, обеспечивающим вращательное движение, получаем следующие разновидности компоновок: $T2 - ZC_h 0XY$ – деталь совершает вращательное движение и поступательное вдоль оси вращения, $T3 - XZC_h 0Y$ – кроме движений в компоновке $T2$, блок, осуществляющий движение детали, производит врезание (подачу), $T4 - XYZC_h 0$ – инструмент жестко связан со стационарным блоком.

При главном вращательном движении инструмента для фрезерной компоновки (Ф) структурная формула базовой системы компоновки имеет вид:

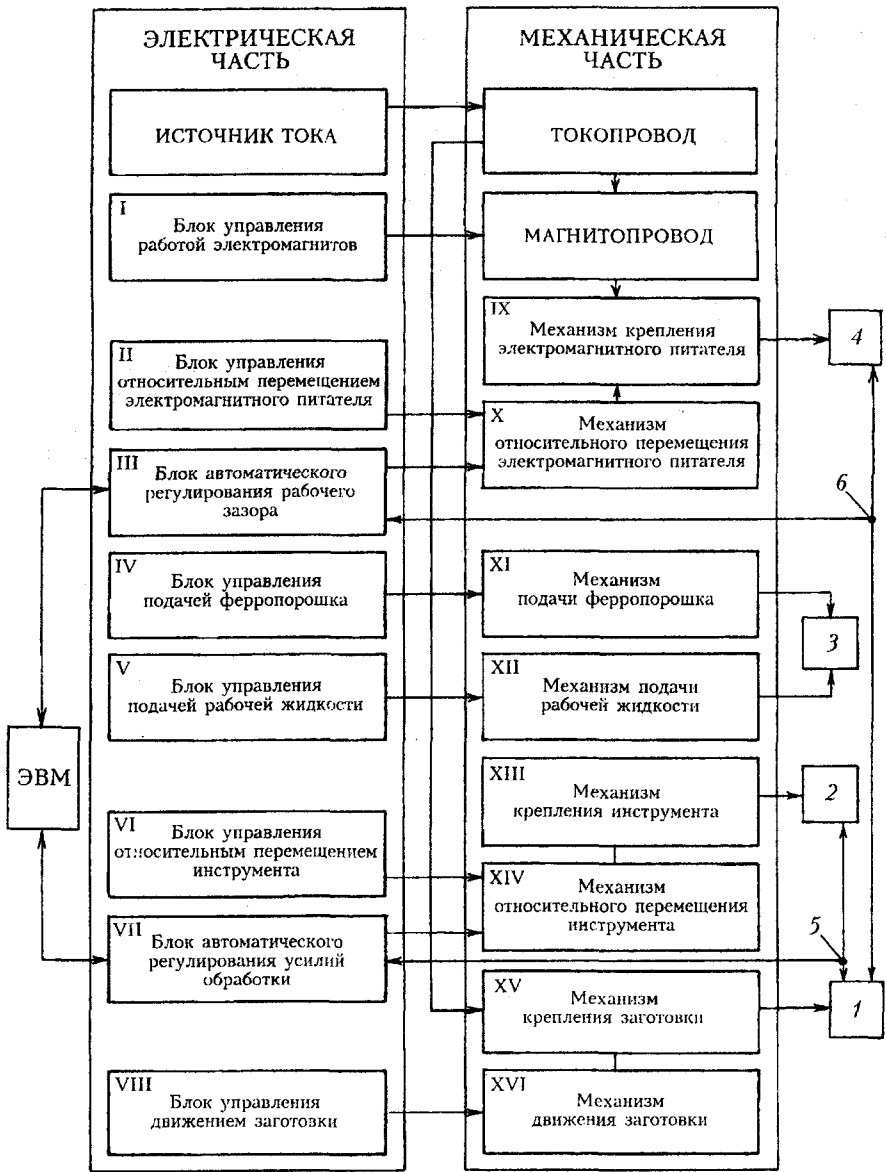




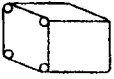


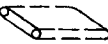

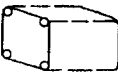



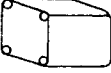




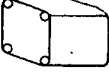
Рис. 1. Обобщенная структурная схема ГПМ: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – инструмент с держателем; 3 – бункерное дозирующее и транспортирующее устройство; 4 – полюсный наконечник электромагнита; 5 – датчик величины усилий обработки; 6 – датчик величины рабочего зазора

$\Phi 1 - XYZ0C_h$ – вращение инструмента относительно горизонтальной оси, движение детали поступательное относительно трех координатных осей.

Часть поступательных движений можно передать блоку инструмента и тогда получаем еще три разновидности компоновок: $\Phi 2 - XY0C_hZ$ – инструмент совершает вращательное и поступательное движения вдоль оси вращения, $\Phi 3 - X0C_hZY$ – деталь совершает только поперечное поступательное движение, $\Phi 4 - 0C_hXYZ$ – все движения технологического процесса, включая и установочные, осуществляются блоком инструмента.

Влияние компоновки на качество обработки определяется структурой и конструктивным исполнением технологического комплекса, размерными пропорциями и расположением узлов в пространстве [8, 9].

Т а б л и ц а 1. Поля компоновки технологического комплекса

Вид обработки	Обозначение	Структурная формула	ПД	ПИ	РП
Токарная	T1	C_h0XYZ			
	T2	ZC_h0XY			
	T3	XZC_h0Y			
	T4	$XYZC_h0$			
Фрезерная	Ф1	$XYZ0C_h$			
	Ф2	$XY0C_hZ$			
	Ф3	$X0C_hZY$			
	Ф4	$0C_hXYZ$			

Нагружение конструкции силами при формообразовании поверхности происходит в пределах некоторой области пространства, которая называется рабочим полем компоновки. В пределах рабочего поля проявляются качественные характеристики ТК – жесткость, точность и др.

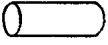

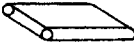
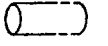
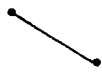
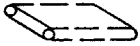


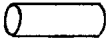
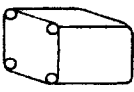


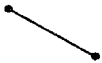



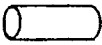


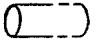



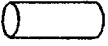




Поскольку формообразование выполняется путем относительных перемещений детали и инструмента, рабочее поле компоновки (РП) образуется в результате взаимодействия областей пространства, которые может занимать деталь наибольших размеров (ПД) и режущая часть инструмента наибольшего размера (ПИ) при всех их координатных перемещениях, из чего следует способ определения пространственных границ РП как области пересечения ПД и ПИ

$$РП = ПД \cap ПИ .$$

Поля деталей, инструментов и рабочее поле компоновки в соответствии с вариантами структурных формул компоновок для четырех видов движений исполнительных органов, описываемых функциональными элементами ТК, приведены в табл. 1. Исключая вертикальное перемещение по оси Y, которое необходимо как установочное при токарной компоновке, получаем виды полей, используемые для оценки качественных показателей компоновки (табл. 2). Убирая движение подвода инструмента и установочные движения детали, получаем минимально необходимые варианты рабочего поля компоновки ТК для производства небольших серий деталей машин.

Анализ простейших компоновок показал, что рабочее поле принимает вид прямой линии. Для рекомендованных методов упрочнения и восстанов-

Т а б л и ц а 2. Поля компоновки технологического комплекса

Вид обработки	Структурная формула	ПД	ПИ	РП
<i>Без учета движений по оси Y</i>				
Токарная	C_h0XZ			
	ZC_h0X			
	XZC_h0			
Фрезерная	$XYZ0C_h$			
	$XY0C_hZ$			
	$X0C_hZY$			
	$0C_hXYZ$			
<i>Без учета подвода и установочных движений</i>				
Токарная	C_h0Z			
	ZC_h0			
Фрезерная	$Z0C_h$			
	$0C_hZ$			

ления при обработке тел вращения наиболее целесообразен первый вариант: вращение детали, перемещение приспособлений, инструментов и средств оснащения (рис. 2).

Предложенный ГПМ позволяет проводить автоматизацию мелкосерийного производства, обеспечивая гибкий переход от технологического к предметному принципу работы за счет совмещения операций процесса обработки [6].

Рациональные маршруты и оптимальные режимы комбинированной обработки. Анализ комбинированных термомеханических и электромагнитных процессов формирования поверхностного слоя [10–13] с позиций явления технологического наследования геометрических показателей качества поверхности [14] дает возможность рекомендовать оптимальные режимы (табл. 3) и рациональные маршруты операций процесса обработки изделий на ГПМ КЭТО.

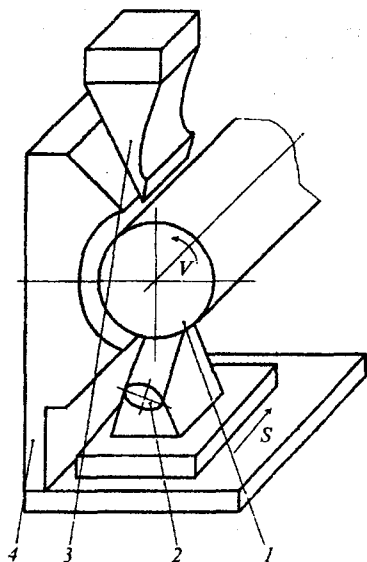


Рис. 2. Компонвочная схема модуля: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – инструмент с держателем; 3 – бункерное дозирующее и транспортирующее устройство; 4 – полюсный наконечник электромагнита

В случае, когда необходимо обеспечить шероховатость поверхности Ra 3.2–6.3 мкм, предлагается электромагнитная наплавка ферропорошка с поверхностным пластическим деформированием при твердости покрытия до 55 HRC [15]. Если твердость превышает 55 HRC, то необходимо ротационное упрочняющее резание с электродуговым нагревом [16].

В случае, когда требуется шероховатость Ra 0.08–0.10 мкм, перед магнитно-абразивным полированием необходимо алмазное шлифование до Ra 1.25 мкм [10]. Если удовлетворяет шероховатость Ra 0.4–0.8 мкм, то после нанесения покрытия необходимо абразивное шлифование и магнитно-абразивное полирование [11, 12].

Поскольку для деталей сельскохозяйственной и автотранспортной техники достаточно обеспечивать шероховатость рабочих поверхностей Ra 0.4–0.8 мкм, для ГПМ рекомендуется следующий набор технологических операций: электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием, ротационное резание с электродуговым нагревом, абразивное шлифование и магнитно-абразивное полирование.

Рациональные маршруты и оптимальные режимы комбинированных высокоэффективных методов обработки упрочненных деталей (табл. 3) позволили спроектировать гибкий производственный модуль.

Использование ГПМ КЭТО, технические характеристики которого приведены в табл. 4, для полного цикла операций технологического процесса по упрочнению и восстановлению наружных поверхностей тел вращения типа валов, осей и втулок на ремонтных предприятиях Республики Беларусь показало высокую эффективность модулей в условиях мелкосерийного производства.

Применение модуля позволило уменьшить численность производственного персонала до двух-трех рабочих-операторов и повысить производительность восстановления деталей в 3–4 раза [6].

Изготовление и применение широкоуниверсальных ГПМ КЭТО в условиях мелкосерийного производства позволяет: существенно повысить производительность благодаря использованию комбинированных методов

Т а б л и ц а 3. **Качество поверхностного слоя деталей с износостойкими покрытиями при оптимальных режимах в процессах высокоэффективной обработки**

Покры- тия	Технологические факторы							Параметры качества				
	V , м.с	S , об/мин (A , мм) [*]	I , А	L , мм (τ , с) [*]	B , Т	t , мм (δ , мм) [*]	P , Н	K (Q_1) [*] , г/дм ²	Sm , мм	Ra , мкм	HRC	δ_H , %
<i>Электродуговая наплавка с упрочняющим ротационным резанием</i>												
65Г	0.01	4.00	150	9	—	1.0	—	0.77	3.8	9.5	53.6	8.2
30ХГСА	0.01	4.00	150	12	—	1.00	—	0.72	4.00	9.8	50.2	7.6
<i>Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием</i>												
Fe-V	0.08	0.32	110	—	1.1	—	1400	0.80 [*]	—	6.3	51.2	1.74
Fe-Ti	0.08	0.32	140	—	0.8	—	1250	1.25 [*]	—	6.9	54.0	—
P6M5K5	0.08	0.32	100	—	0.8	—	1350	0.51 [*]	—	6.2	50.7	—
<i>Магнитно-абразивное полирование</i>												
P6M5K5	3.0	1.2 [*]	—	70 [*]	1.2	1.1 [*]	—	1.10 [*]	—	0.07	—	—

^{*}) Технологические факторы электромагнитной наплавки и магнитно-абразивного полирования.

обработки; автоматизировать производство как с технологическим, так и с предметным принципом организации; радикально изменить организацию производства за счет его высокой гибкости; построить производство на принципах самоорганизации технологических процессов и объектов.

Таким образом, на основании проведенных исследований разработана методология оптимизационного синтеза технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий, включающая: а) анализ высокоэффективных методов обработки; б) структурный синтез технологических комплексов; в) параметрическую оптимизацию производственных модулей.

Методология охватывает основные направления развития технологических комплексов, выделенные И. И. Артоболовским [1] и Л. Н. Кошкиным [2]: 1) использует структурную и параметрическую избыточность в технологической системе; 2) применяет адаптацию обрабатывающих и обслуживающих подсистем; 3) объединяет материальное и информационное обеспечение технологических комплексов.

При проектировании технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий предложено [17, 18] ограничивать структурную и параметрическую избыточность обрабатывающей системы, обеспечивая самоорганизацию и самонастройку функциональных подсистем комплекса на основе пространственной и временной концентрации технологических операций и транспортных переходов.

Т а б л и ц а 4. **Техническая характеристика ГПМ КЭТО**

Характеристики	Значения
Максимальные размеры обрабатываемой детали, мм:	
диаметр	200
длина	250
Максимальная скорость вращения обрабатываемой детали, м/с	3
Число электромагнитных катушек	2
Максимальный ток, А:	
подаваемый на катушки	6
разрядный в рабочем зазоре	180
Максимальная магнитная индукция в рабочем зазоре, Т	1.5
Установленная мощность, кВт	3.5
Габаритные размеры, мм	1800×1450×1200
Масса, кг	1650

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект 98-181).

Обозначения

X, Y, Z – поступательные движения по осям x, y, z ; C – вращательное движение вокруг оси z ; h – горизонтальное расположение оси вращения; 0 – стационарный блок; T – токарная компоновка; Φ – фрезерная компоновка; $РП$ – рабочее поле компоновки; $ПД$ – поле детали; $ПИ$ – поле инструмента; V – скорость главного движения; S – скорость подачи; A – амплитуда осцилляций; I – сила тока; L – расстояние от пятна нагрева до инструмента; τ – время обработки; B – магнитная индукция; t – глубина слоя; δ – величина рабочего зазора; P – сила давления; K – отношение скоростей дополнительного и главного движения; Q – удельная производительность обработки; Sm – средний шаг неровностей; Ra – среднеарифметическое отклонение профиля; HRC – твердость по Роквеллу; δ_n – степень упрочнения наклепа поверхности; ε_0 – относительная износостойкость.

Литература

1. Артоболовский И. И., Ильинский Д. Я. Основы синтеза систем машин автоматического действия. М., 1983.
2. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии. М., 1982.
3. Акулович Л. М., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л., Зевелева Е. З. // ИФЖ. 1999. Т. 72, № 5. С. 971–979.
4. Гибкое автоматизированное производство. Л., 1983.
5. Bradley D. A., Dawson D., Burd N. S., Leader A. J. Mechatronics-Electronics in Products and Processes. Chapman & Hall, 1993.
6. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // Вестник машиностроения. 1996. № 3. С. 33–36.
7. Ящерицын П. И., Чемисов Б. П., Хейфец М. Л., Зевелева Е. З. // Современные проблемы машиноведения. Гомель. 1998. Т. 2. С. 117–120.
8. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков. М., 1978.
9. Маталин А. А., Дашевский Т. Б., Княжицкий И. И. Многооперационные станки. М., 1974.
10. Ящерицын П. И., Забавский М. Т., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // Изв. АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1997. № 1. С. 42–45.
11. Ящерицын П. И., Забавский М. Т., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1997. № 2. С. 56–59.
12. Ящерицын П. И., Деев Г. А., Кожуро Л. М., Щукин В. С. // Изв. АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1993. № 4. С. 36–40.
13. Кожуро Л. М., Щукин В. С., Хилько Д. Н., Кожуро С. Л., Шадуя В. Л. // Изв. АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1997. № 1. С. 62–69.
14. Ящерицын П. И., Забавский М. Т., Кожуро Л. М., Акулович Л. М. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. Минск, 1988.
15. Хейфец М. Л., Кожуро Л. М., Шипко А. А. и др. // ИФЖ. 1996. Т. 69, № 1. С. 46–57.
16. Хейфец М. Л., Кожуро Л. М., Шипко А. А. и др. // ИФЖ. 1995. Т. 68, № 6. С. 931–943.
17. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л., Чемисов Б. П. // Докл. НАН Беларуси. 1997. Т. 41, № 3. С. 121–127.
18. Ящерицын П. И., Чемисов Б. П., Хейфец М. Л. // Современные проблемы машиноведения. Гомель. 1996. С. 112–113.

Конструкторско-технологический институт средств механизации и автоматизации, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк

Поступила 24.08.1998, в окончательной редакции – 23.03.2000.