

УДК 681.5.01:388.24:658.512

**УПРАВЛЕНИЕ ОПЕРАЦИЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
НА ОСНОВЕ ЕЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО И СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА**

*канд. техн. наук, доц. В.Н. КОРЕШКОВ
(Госстандарт Республики Беларусь, Минск);
д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, Т.А. АЛЕКСЕЕВА
(Полоцкий государственный университет)*

Показано, что при использовании статистического структурного анализа комбинированной термомеханической обработки для детализации технологической операции – резание с предварительным плазменным нагревом срезаемого слоя – следует разделять группы физико-механических и геометрических параметров качества. Установлено, что для управления геометрическими параметрами следует использовать факторы размещения и движения инструмента, а для управления физико-механическими параметрами – термомеханические факторы. Предложены мероприятия по оперативному управлению операцией комбинированной обработки: регулирование интенсивности нагрева и скорости подачи инструмента, а также статистический контроль волнистости и твердости поверхности.

Введение. Метод структурного анализа – один из основных методов, используемых при исследовании и разработке технических систем [1, 2]. Для его обозначения используют аббревиатуру SADT. Метод SADT предполагает последовательную детализацию анализируемой системы «сверху – вниз».

Выделяют различные уровни рассмотрения системы. На каждом уровне представляют разложение анализируемой системы, более детализированное, но полностью эквивалентное предшествующему уровню. При этом рассматривают не только систему, но и окружающую ее среду, которая также подвергается последовательной детализации вместе с системой.

Графическое и текстовое описание структуры системы в виде необходимых схем и пояснений к ним образует модель системы. Для полного описания системы разрабатывают несколько моделей, между которыми устанавливают взаимосвязи. Объектом анализа может быть проектируемая система (на верхнем уровне) либо ее часть (на более низких уровнях). Объект анализа на схеме изображается прямоугольником. Среда изображается стрелками (вход, выход, управление и механизм), направленными к прямоугольнику либо от него [3, 4].

Интерпретация разных составляющих среды различна в зависимости от того, является ли объект анализа предметом или операцией.

Если объект анализа – операция:

- стрелка входа изображает предметы, перерабатываемые операцией;
- стрелка выхода – предметы, получаемые в результате операции;
- стрелка управления – условия, при которых выполняется операция;
- стрелка механизма – средства реализации анализируемой операции.

Если под операцией понимать технологическую операцию:

- входом будут показатели качества заготовки, поступающей на операцию;
- выходом – показатели качества заготовки после выполнения операции;
- управлением – содержание операции, отраженное в изменяемых и контролируемых технологических факторах;
- механизмом – данные о мало изменяющихся характеристиках технологической системы.

Метод SADT, как и другие универсальные методы, рекомендует, как проводить процесс анализа и как оформить его результаты, но не дает никаких рекомендаций о способах разбиения. Этот вопрос связан с особенностями каждой предметной области и требует знания сущности проблемы. Для каждой предметной области могут быть выработаны конкретные рекомендации, сокращающие объем творческой работы и повышающие тем самым производительность труда при проектировании системы или ее анализе [5, 6].

Трудно формализуемым, но необходимым условием структурного анализа при детализации операций технологического процесса, является выделение из многочисленных технологических воздействий (описывающих механизм операции) управляющих технологических факторов (определяющих параметры качества обработки) [7]. Наиболее сложны в управлении комбинированные процессы обработки, совмещающие разнообразные технологические воздействия [8].

Статистическая модель операции комбинированной обработки. Для изучения принципов управления технологической операцией комбинированной обработки рассмотрим упрочняющее резание с нагревом – оплавлением срезаемого слоя. Операция совмещает термообработку с удалением дефектного поверхностного слоя резанием и упрочняющим деформированием обрабатываемой поверхности. Для

временного снижения прочности дефектного слоя используется плазменный нагрев, а для удаления припуска и деформирования поверхности применяется режущий инструмент [8, 9].

Нагрев срезаемого слоя проводился с использованием установки для воздушно-плазменной резки АПР-402. Плазматрон для механизированной резки ПВР-402 закреплялся в специальном приспособлении на токарно-винторезном станке 16К20. Постоянными факторами в опытах при плазменном нагреве были: напряжение плазменной дуги ($U_H = 120$ В); удаление сопла плазматрона от обрабатываемой поверхности ($h_c = 12$ мм); расход плазмообразующего газа – воздуха ($G_g = 40$ л/мин) [9].

Для комбинированной обработки – резания заготовки из сплава ЖС6К с дополнительным плазменным нагревом – исследовались зависимости параметров качества:

- физико-механических ($Y_1 = HRC$ – твердости; $Y_2 = U_n, \%$, – наклепа);
- геометрических ($Y_3 = Sm_w, \text{мм}$, – волнистости; $Y_4 = Ra, \text{мкм}$, – шероховатости);
- от основных технологических факторов: $X_1 = I$ – силы тока плазменной дуги; $X_2 = L$ – расстояния от пятна нагрева до режущей кромки инструмента; $X_3 = S$ – скорости подачи инструмента; $X_4 = V$ – скорости главного движения; $X_5 = t$ – глубины резания для удаления дефектного слоя.

В качестве статистической модели комбинированной обработки применяли квадратичные функции, а для их построения и оценивания использовался дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализ.

Уравнения регрессии получали с помощью математического планирования экспериментов [9, 10].

Опыты проводили по матрице центрального композиционного рототабельного униформ-планирования (ЦКРУП) второго порядка (табл. 1). Условия опытов представлены в таблице 2.

Таблица 1

Матрица ЦКРУП второго порядка для $k = 5$

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	+	+	+	+	+	17	+2	0	0	0	0
2	-	+	+	+	-	18	-2	0	0	0	0
3	+	-	+	+	-	19	0	+2	0	0	0
4	-	-	+	+	+	20	0	-2	0	0	0
5	+	+	-	+	-	21	0	0	+2	0	0
6	-	+	-	+	+	22	0	0	-2	0	0
7	+	-	-	+	+	23	0	0	0	+2	0
8	-	-	-	+	-	24	0	0	0	-2	0
9	+	+	+	-	-	25	0	0	0	0	+2
10	-	+	+	-	+	26	0	0	0	0	-2
11	+	-	+	-	+	27	0	0	0	0	0
12	-	-	+	-	-	28	0	0	0	0	0
13	+	+	-	-	+	29	0	0	0	0	0
14	-	+	-	-	-	30	0	0	0	0	0
15	+	-	-	-	-	31	0	0	0	0	0
16	-	-	-	-	+	32	0	0	0	0	0

Таблица 2

Условия опытов по матрице ЦКРУП для $k = 5$

Уровни факторов X_i	Технологические факторы				
	$I, \text{А}$	$L, \text{мм}$	$S, \text{мм/об}$	$V, \text{м/с}$	$t, \text{мм}$
-2	60	40	0,05	1,0	0,05
-1	80	50	0,10	1,5	0,10
0	100	60	0,15	2,0	0,15
+1	120	70	0,20	2,5	0,20
+2	140	80	0,25	3,0	0,25

Значимость коэффициентов регрессий определялась по критерию Стьюдента, адекватность моделей – по критерию Фишера. Обработка результатов опытов позволила получить уравнения регрессии:

$$Y_1 = 31,710 - 1,606X_1 - 0,438X_2 + 0,563X_3 + 1,105X_4 + 0,104X_5 + 0,281X_1X_2 + 0,281X_1X_3 + 0,594X_1X_4 + 0,281X_1X_5 - 0,781X_2X_3 + 0,406X_2X_4 + 0,469X_2X_5 - 0,219X_3X_4 - 0,719X_3X_5 - 0,219X_4X_5 - 1,312X_1^2 - 1,255X_2^2 - 1,000X_3^2 - 1,749X_4^2 - 1,063X_5^2; \tag{1}$$

$$Y_2 = 2,952 - 0,690X_1 - 0,172X_2 + 0,613X_3 + 0,732X_4 - 0,018X_5 - 0,094X_1X_2 + 0,107X_1X_3 - 0,263X_1X_4 + 1,383X_1X_5 - 0,053X_2X_3 - 0,231X_2X_4 - 0,447X_2X_5 - 0,409X_3X_4 + 0,287X_3X_5 + 0,449X_4X_5 - 1,039X_1^2 + 0,016X_2^2 + 0,055X_3^2 - 0,627X_4^2 - 0,417X_5^2; \tag{2}$$

$$Y_3 = 0,9425 + 0,035X_1 - 0,052X_2 - 0,073X_3 + 0,039X_4 + 0,026X_5 - 0,041X_1X_2 + 0,015X_1X_3 + 0,018X_1X_4 - 0,016X_1X_5 - 0,100X_2X_3 + 0,128X_2X_4 + 0,021X_2X_5 - 0,114X_3X_4 - 0,028X_3X_5 + 0,050X_4X_5 - 0,059X_1^2 + 0,163X_2^2 + 0,071X_3^2 + 0,091X_4^2 + 0,057X_5^2; \tag{3}$$

$$Y_4 = 7,639 + 2,273X_1 - 1,917X_2 + 1,092X_3 - 1,139X_4 - 1,030X_5 - 0,237X_1X_2 + 0,731X_1X_3 - 3,052X_1X_4 + 1,372X_1X_5 + 0,342X_2X_3 - 0,541X_2X_4 - 0,219X_2X_5 + 0,187X_3X_4 + 1,194X_3X_5 + 0,099X_4X_5 + 1,593X_1^2 + 1,779X_2^2 - 0,331X_3^2 - 1,810X_4^2 - 0,774X_5^2. \tag{4}$$

Установлено, что все коэффициенты регрессий значимы с 90 % доверительной вероятностью; статистические параметры моделей (1) и (4) адекватны при 1 %, моделей (2) и (3) – при 5 % уровне значимости.

Управление операцией комбинированной термомеханической обработки. Изучение членов, описывающих взаимодействие факторов на многоугольниках предпочтений (рис. 1), позволило определить значимость взаимной корреляции факторов по диаграммам Лоренца (рис. 2), в которых факторы ранжируются по возрастанию. Анализ линейных членов по диаграммам Парето (рис. 3) дал возможность определить степень влияния факторов на параметры.

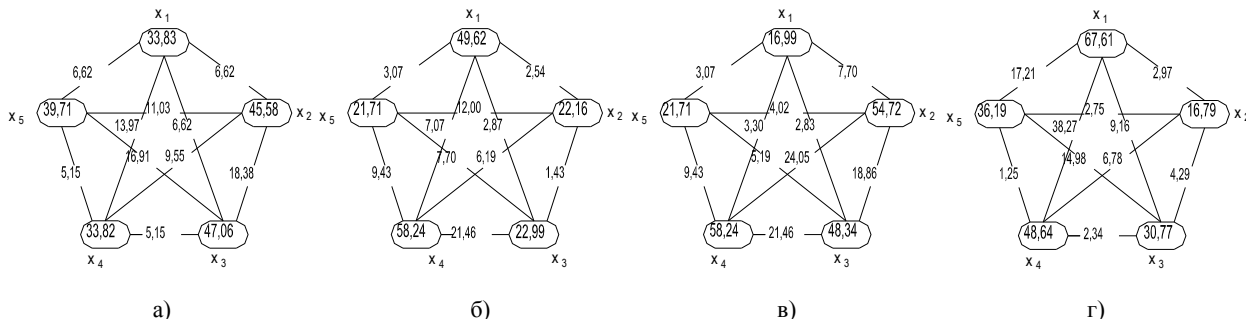


Рис. 1. Многоугольники предпочтений для параметров Y_1 (а), Y_2 (б), Y_3 (в), Y_4 (г) при комбинированной обработке

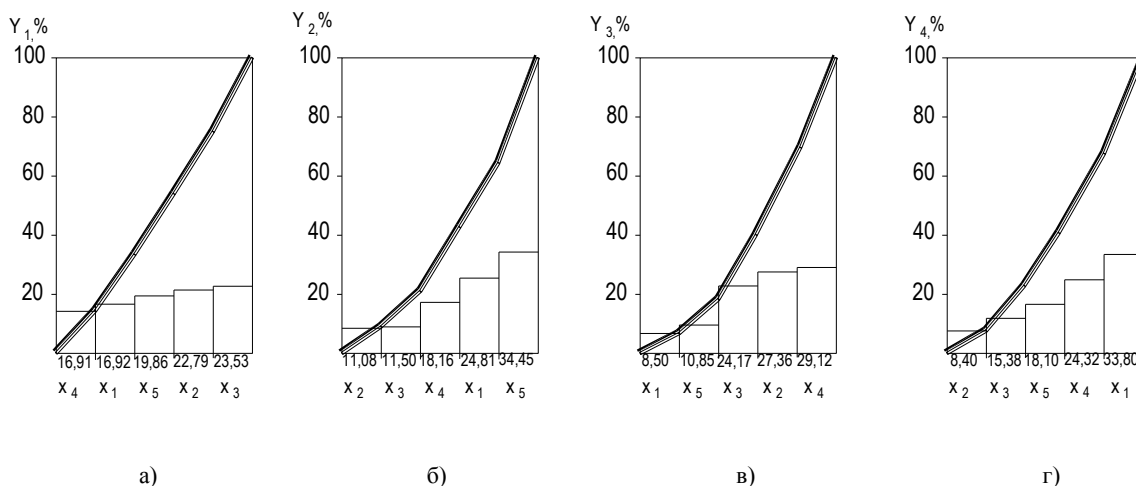


Рис. 2. Диаграммы Лоренца для параметров Y_1 (а), Y_2 (б), Y_3 (в), Y_4 (г) при комбинированной обработке

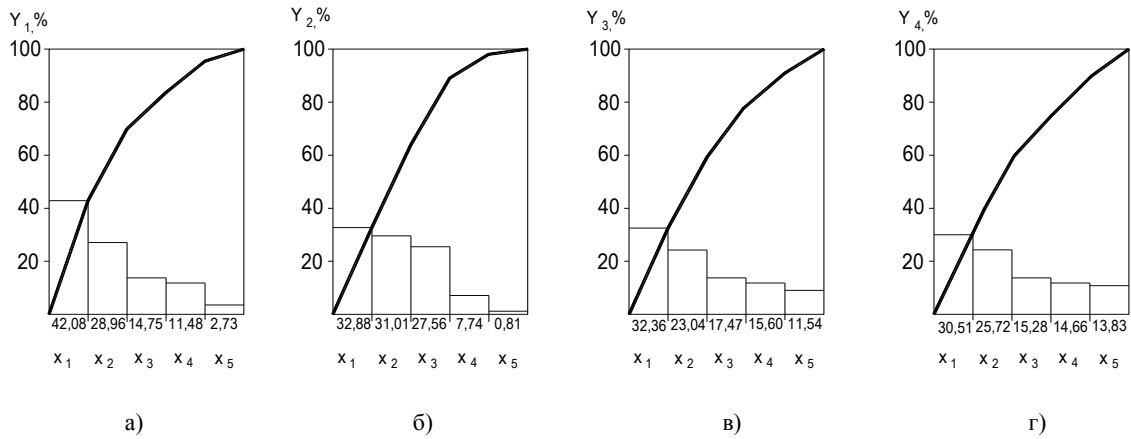


Рис. 3. Диаграммы Парето для параметров Y_1 (а), Y_2 (б), Y_3 (в), Y_4 (г) при комбинированной обработке

С учетом степени влияния на параметры и значимости взаимной корреляции факторы X_1, \dots, X_5 в порядке предпочтения (\rightarrow) можно расположить в ряды (табл. 3).

Таблица 3

Степень влияния и взаимная корреляция факторов для различных параметров

Параметры	Степень влияния	Взаимная корреляция
Y_1	$X_5 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1$	$X_4 = X_1 \rightarrow X_5 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$
Y_2	$X_5 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4$	$X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1 \rightarrow X_5$
Y_3	$X_5 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$	$X_1 \rightarrow X_5 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2 \rightarrow X_4$
Y_4	$X_5 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1$	$X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_5 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1$

Управлять операцией целесообразно с помощью наиболее влиятельных и наименее коррелированных с другими факторов, поэтому для обеспечения параметров Y_1 и Y_2 наилучшим образом факторы X_1, X_4 и может использоваться X_3 , а для Y_3 и Y_4 подходят факторы X_2 и X_3 , а также X_1 .

В результате физико-механическими факторами $Y_1 = HRC, Y_2 = U_n$ параметрами наиболее рационально управлять с помощью термомеханическими факторами $X_1 = I, X_4 = V$, а также $X_3 = S$; геометрическими $Y_3 = Sm_w$ и $Y_4 = Ra$ путем рационального размещения инструмента, используя факторы $X_2 = L$ и $X_3 = S$, а также, регулируя жесткость его контакта с обрабатываемым материалом посредством нагрева, $X_1 = I$.

Для комплексной оптимизации параметров качества и управления комбинированным процессом использовали диаграмму «причины – результат» (рис. 4), для которой в качестве цели рассматривали обобщенную функцию желательности Харрингтона:

$$Z = \sqrt[5]{d_1 d_2 d_3 d_4 d_5},$$

где $d_i = \exp[-\exp(-Y_i^*)]$ для $i = 1, 2, 3, 4, 5$ (рис. 5).

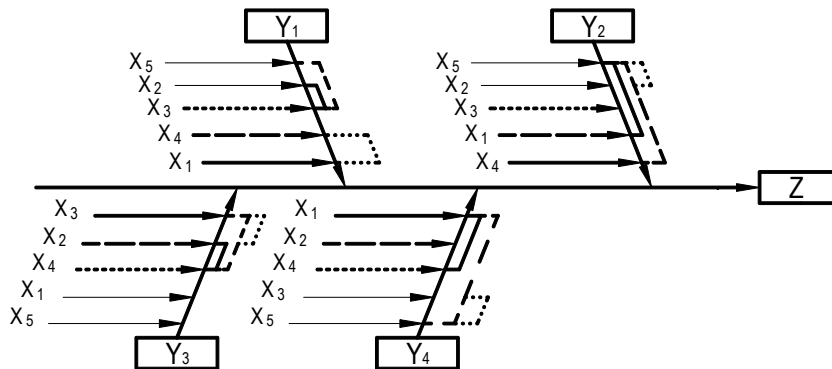


Рис. 4. Диаграмма «причины – результат» для управления операцией комбинированной обработки

Для желательностей составлены шкалы (см. рис. 5) исходя из значимости параметров Y_1, \dots, Y_4 и возможностей их регулирования технологическими факторами X_1, \dots, X_5 согласно диаграмме «причины – результат» (см. рис. 4).

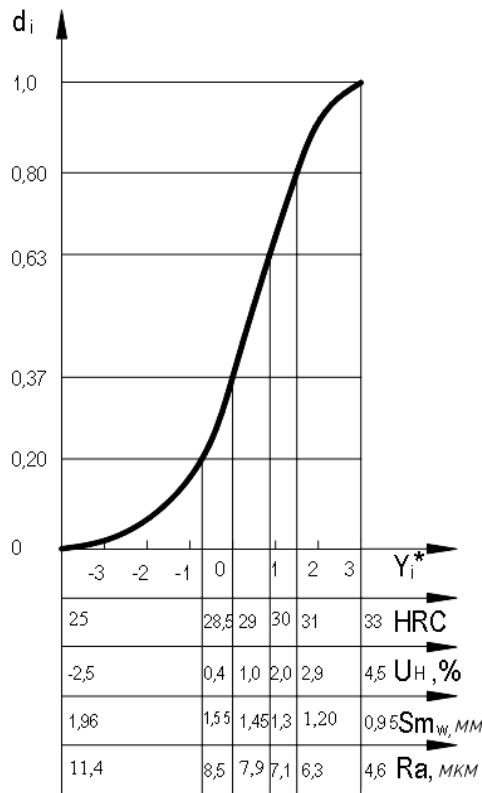


Рис. 5. Функция d_i и шкалы желательности Y_i^* параметров оптимизации комбинированного процесса

Комплексную оптимизацию процесса резания с нагревом срезаемого слоя, представленного уравнениями (1)...(4), проводили методом спирального координатного спуска по обобщенной функции желательности [9, 10]. Результаты оптимизации дают возможность рекомендовать при глубине резания 2 мм режимы обработки: $I = 100$ А; $L = 65$ мм; $S = 0,1$ мм/об; $V = 2,0$ м/с, для которых функция желательности максимальна ($Z = 0,85$), параметры качества обрабатываемой поверхности: $HRC = 31,5$; $U_n = 3$ %; $S_{mw} = 0,95$ мм; $Ra = 6,3$ мкм.

При использовании структурного анализа [11] комбинированной термомеханической обработки для детализации на SADT-диаграмме технологической операции – резания с предварительным плазменным нагревом срезаемого слоя (рис. 6) – следует разделять группы физико-механических и геометрических параметров качества (рис. 7).

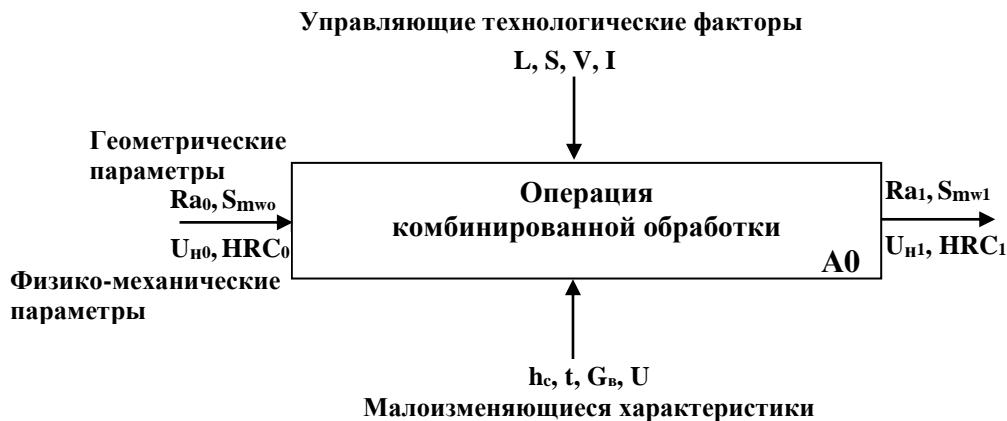


Рис. 6. Модель верхнего уровня операции комбинированной обработки

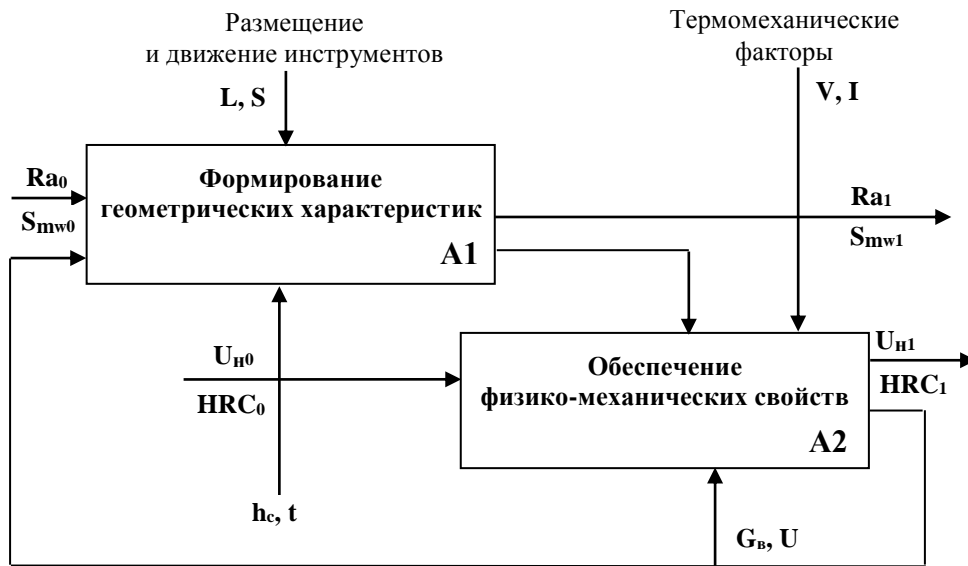


Рис. 7. Концептуальная модель операции комбинированной обработки

Для управления геометрическими параметрами $Y_3 = S_{mw}$ и $Y_4 = Ra$ следует использовать факторы размещения и движения инструмента $X_2 = L$ и $X_3 = S$ (рис. 8).

Для управления физико-механическими параметрами $Y_1 = HRC$ и $Y_2 = U_n$ – термомеханические факторы $X_1 = I$ и $X_4 = V$ (рис. 9).

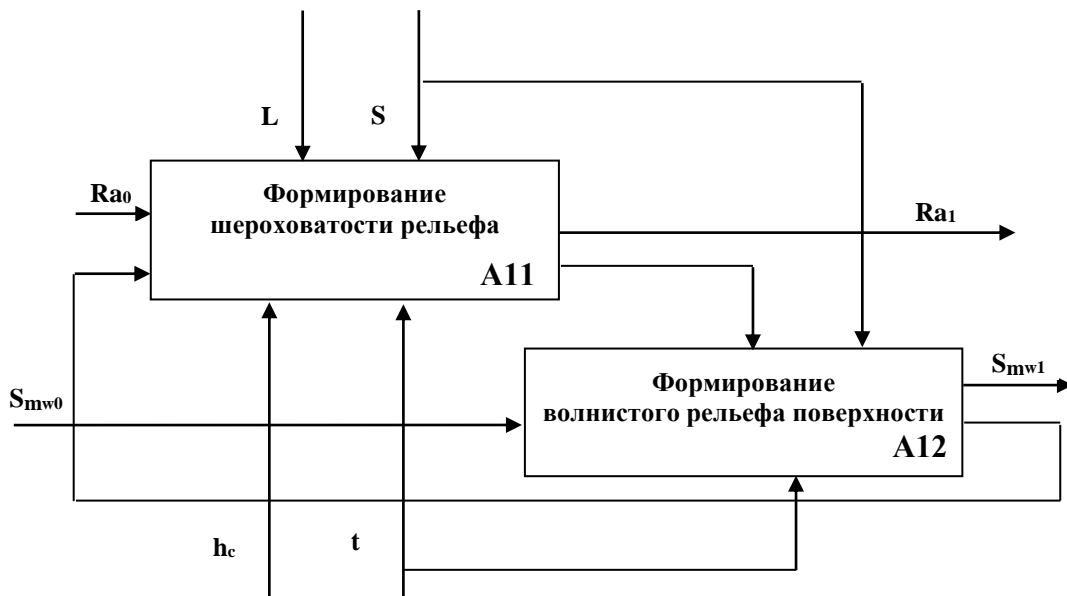


Рис. 8. Декомпозиция блока А 1 (формирование геометрических характеристик)



Рис. 9. Декомпозиция блока А2 (обеспечение физико-механических свойств)

Заключение. На основе статистического и структурного анализа операции комбинированной обработки для обеспечения оптимального комплекса параметров качества при резании с предварительным плазменным нагревом следует рекомендовать:

- регулирование интенсивности $X_1 = I$ и положения источника нагрева $X_2 = L$, а также скорости движений обработки $X_3 = S$ и $X_4 = V$;
- статистический контроль геометрического Ra и физико-механического U_n параметров с помощью контрольных карт, проводя измерения после операции;
- экспресс-оценку волнистости поверхности Sm_w визуально, а твердости HRC коэрцетиметром непосредственно в процессе комбинированной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марка, Д. Методология структурного анализа и проектирования / Д. Марка, К. МакГоуэн. – М.: Мета Технология, 1993. – 240 с.
2. Окулесский, В.А. Функциональное моделирование – методологическая основа реализации процессного подхода / В.А. Окулесский. – М.: НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2001. – 280 с.
3. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / под ред. Б.И. Черпакова. – М.: ГУП «ВИМИ», 1999. – 512 с.
4. CALS в авиастроении / под ред. А.Г. Братухина. – М.: МАИ, 2000. – 304 с.
5. Информационные технологии в наукоемком машиностроении: компьютерное обеспечение индустриального бизнеса / под общ. ред. А.Г. Братухина. – Киев: Техника, 2001. – 728 с.
6. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под общ. ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с.
7. Менеджмент качества предприятий машиностроения / В.Н. Корешков [и др.]. – Минск: Экономика и право, 2003. – 224 с.
8. Корешков, В.Н. Использование структурного анализа для управления и контроля операций комбинированной обработки / В.Н. Корешков, М.Л. Хейфец, Т.А. Алексеева // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2008. – № 3. – С. 53 – 59.
9. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
10. Статистический анализ конструктивных элементов и технологических параметров деталей машин / М.Л. Хейфец [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – 112 с.
11. Управление качеством / В.Н. Корешков [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – 140 с.

Поступила 14.07.2008