

## ИНФОРМАТИКА

УДК 681.5.01:388.24:658.512

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ОПЕРАЦИЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

*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)*

*Определено трудно формализуемое, но необходимое условие структурного анализа при детализации операций технологического процесса – выделение из многочисленных технологических воздействий управляющих технологических факторов обработки. Показано, что при использовании структурного анализа комбинированной термомеханической обработки для детализации на структурной диаграмме технологической операции – упрочняющее резание с предварительным плазменным оплавлением 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. В качестве мероприятий по оперативному управлению процессом предложены: регулирование интенсивности нагрева и скорости движений обработки, а также долговременный статистический контроль определяющих геометрического и физико-механического параметров качества.*

**Введение.** Метод структурного анализа является одним из основных методов, используемых при исследовании и разработке технических систем, включая сложные производственно-технологические системы. Для обозначения этого метода используют аббревиатуру SADT, а сам метод называют методом SADT-диаграмм [1, 2]. Метод предполагает последовательную детализацию анализируемой системы «сверху – вниз». Выделяют различные уровни рассмотрения проектируемой 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, она также подвергается последовательной детализации вместе с системой. Графическое и текстовое описание структурной системы в виде необходимых схем и пояснений к ним образует модель системы, отображающую последнюю с определенной точки зрения. 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].

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 объекта на части. Этот вопрос тесно связан с особенностями каждой предметной области и требует знания не только методологии SADT, но и 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].

**Метод структурного анализа.** В SADT предполагается, что объекты анализа бывают двух типов: либо предметы, либо операции. Объекту анализа присваивается наименование, размещаемое внутри прямоугольника (рис. 1). Для конкретизации стрелке присваивают обозначение, состоящее из латинской буквы, указывающей ее функцию (I, O, C, M), и порядкового номера. На поле схемы, вблизи соответствующей стрелки размещают ее наименование.

На верхнем уровне модели изображают схему, отражающую всю анализируемую (проектируемую) производственную систему. Входные и выходные данные, наименование которых указывается у соответствующих стрелок схемы модели верхнего уровня, определяются, как правило, целью анализа, полнотой информации об анализируемом объекте или техническим заданием на выполнение анализа или разработку системы.

На верхних уровнях осуществляется чисто функциональное разбиение модели без учета и выбора методов реализации, т.е. без изображения на схемах стрелки механизма. Когда детализация будет проведена достаточно подробно и появится возможность выбрать эффективные средства реализации, тогда можно вернуться к определению механизма. Механизм не возникает ни из входа, ни из выхода, ни из

управления и их не определяет, являясь независимой составляющей среды. Аналогично, для моделей верхнего уровня может быть недостаточно определено содержание управления. В этом случае следует использовать обобщение наименования соответствующих стрелок, детализируя их содержание в моделях следующих уровней [7, 8].

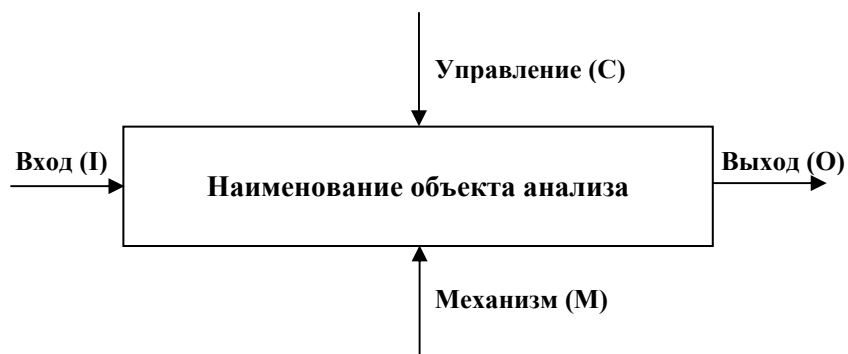


Рис. 1. Изображение объекта анализа и его среды

Интерпретация разных составляющих среды, изображенных стрелками на рисунке 1, различна в зависимости от того, является ли объект анализа предметом или операцией.

Если объект анализа – предмет, то операции образуют его внешнюю среду. Так, в случае анализа производственных систем в качестве предметов рассматриваются производственные данные, а в качестве операции – преобразования над производственными данными. При этом объектом анализа могут быть данные в среде преобразования или преобразования в среде данных.

В случае, когда объект анализа – предмет:

- стрелка входа изображает операцию, создающую этот предмет;
- стрелка выхода – операцию, использующую данный предмет;
- стрелка управления – условия существования предмета (может отсутствовать);
- схема механизма – средства воплощения.

Если объект анализа – операция, то имеем следующую картину:

- 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, например, 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.

**Детализация модели предмета и операции.** Модель системы представляет собой иерархический набор SADT-схем. Каждая схема является детализацией какого-либо объекта (предмета или операции) и окружающей среды из схемы предыдущего (более высокого) уровня. При этом анализируемый объект представляется на схеме в виде набора объектов (как правило, их не более шести для разложения одного уровня), изображаемых в виде прямоугольников и связей между ними, обозначаемых стрелками входа, выхода, управления. Части, на которые разложен анализируемый объект, должны в совокупности точно представлять этот исходный объект и, кроме того, не пересекаться. Совокупность стрелок, входящих в схему и выходящих из нее, образует среду схемы, которая должна точно совпадать со средой анализируемого объекта, изображаемого в виде прямоугольника на схеме предыдущего уровня. К этой среде не должно ничего добавляться, но и ничего из нее не должно быть потеряно [8, 9].

Модель операции обозначают *A*, модель предметов – *D* (данных). Каждый прямоугольник на схеме имеет номер. Нумерация осуществляется слева направо и сверху вниз. Обозначение схемы состоит из буквы, обозначающей вид модели (*A* или *D*), и номера схемы. Схема первого уровня разложения анализируемого объекта на прямоугольники имеет номер «ноль» (*A* или *D*). Схемы следующих уровней имеют номера, состоящие из последовательности номеров прямоугольников в схеме (начиная с первого уровня), в которые входит детализируемый прямоугольник.

Роль разных составляющих среды (стрелок) в формировании границ разложения данного уровня различна в зависимости от того, строится модель операций или модель предметов. В модели предметов

не может отсутствовать стрелка входа, а в модели операций не может отсутствовать стрелка управления, так как она определяет границы разложения.

Отсутствие стрелок входа в прямоугольник операции или стрелки управления в прямоугольник предмета допускается только тогда, когда изображаемые стрелками объекты могут быть легко восстановлены по стрелкам входа и содержанию прямоугольника, так как опускание очевидных стрелок упрощает схему и облегчает ее понимание.

Таким образом, трудно формализуемым, но необходимым условием структурного анализа при де-таллизации операций технологического процесса, является выделение из многочисленных технологиче-ских воздействий (описывающих механизм операции), управляющих технологических факторов (опре-деляющих параметры качества обработки).

**Статистическая модель процесса комбинированной обработки.** Наиболее сложны в управ-лении комбинированные процессы обработки, совмещающие разнообразные технологические воздей-ствия [10]. Для изучения управления комбинированной обработкой рассмотрим упрочняющее резание с нагревом – оплавлением срезаемого слоя. Процесс совмещает операции термообработки с удалением дефектного поверхностного слоя резанием и упрочняющим деформированием обрабатываемой поверх-ности. Для временного снижения прочности дефектного слоя используется дополнительный нагрев, а для удаления припуска и деформирования поверхности применяется режущий инструмент [10, 11].

Нагрев срезаемого слоя проводился с использованием установки для воздушно-плазменной резки АПР-402. Плазматрон для механизированной резки ПВР-402 закреплялся в специальном приспособле-нии на токарно-винторезном станке 16К20. Постоянными факторами в опытах при плазменном нагреве были: напряжение плазменной дуги ( $U = 120$  В); диаметр сопла плазматрона ( $d_c = 3,2$  мм); его удаление от обрабатываемой поверхности ( $h_c = 12$  мм); расход плазмообразующего газа-воздуха ( $G_e = 40$  л/мин) [10].

Для комбинированного процесса – упрочняющего резания заготовки из стали 65Г с дополнитель-ным плазменным нагревом – исследовались зависимости параметров обработки: физико-механических ( $Y_1 = HRC$  – твердости и  $Y_2 = U_n, \%$  – наклепа); геометрических ( $Y_3 = Sm_w, \text{ мм}$  – волнистости и  $Y_4 = Ra, \text{ мкм}$  – 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. Глубину резания для удаления дефектного слоя назначали ( $t = 2$  мм).

В качестве статистической модели комбинированного процесса применяли квадратичные функ-ции, а для их построения и оценивания использовался дисперсионный, корреляционный и регрессион-ный анализ. Уравнения регрессии получали с помощью математического планирования эксперимен-тов [11, 12]. Опыты проводили по матрице центрального композиционного рототабельного равномер-ного планирования (ЦКРУП) второго порядка (табл. 1). Условия опытов представлены в таблице 2.

Таблица 1

Матрица ЦКРУП второго порядка для k = 4

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	+	+	+	+	9	+	+	+	-	17	+2	0	0	0	25	0	0	0	0
2	-	+	+	+	10	-	+	+	-	18	-2	0	0	0	26	0	0	0	0
3	+	-	+	+	11	+	-	+	-	19	0	+2	0	0	27	0	0	0	0
4	-	-	+	+	12	-	-	+	-	20	0	-2	0	0	28	0	0	0	0
5	+	+	-	+	13	+	+	-	-	21	0	0	+2	0	29	0	0	0	0
6	-	+	-	+	14	-	+	-	-	22	0	0	-2	0	30	0	0	0	0
7	+	-	-	+	15	+	-	-	-	23	0	0	0	+2	31	0	0	0	0
8	-	-	-	+	16	-	-	-	-	24	0	0	0	-2					

Таблица 2

Условия опытов по матрице ЦКРУП для k = 4

Уровни факторов X <sub>i</sub>	Технологические факторы			
	I, А	L, мм	S, мм/об	V, м/с
-2	60	30	0,05	2,0
-1	70	40	0,10	2,5
0	80	50	0,15	3,0
+1	90	60	0,20	3,5
+2	100	70	0,25	4,0

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

$$Y_1 = 45,696 - 0,876X_1 + 1,626X_2 + 0,209X_3 + 0,459X_4 + 0,688X_1X_2 + 0,688X_1X_3 + 0,063X_1X_4 + 0,063X_2X_3 + 0,688X_2X_4 + 0,688X_3X_4 + 0,755X_1^2 + 0,880X_2^2 + 0,755X_3^2 + 0,506X_4^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 6,683 - 0,445X_1 - 0,171X_2 + 0,123X_3 + 0,127X_4 - 0,267X_1X_2 + 0,011X_1X_3 + 0,039X_1X_4 - 1,034X_2X_3 - 0,029X_2X_4 + 0,195X_3X_4 + 0,062X_1^2 + 0,252X_2^2 + 0,125X_3^2 + 0,117X_4^2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 1,130 + 0,051X_1 + 0,051X_2 + 0,002X_3 + 0,003X_4 + 0,002X_1X_2 + 0,002X_1X_3 + 0,008X_1X_4 + 0,002X_2X_3 + 0,008X_2X_4 - 0,002X_3X_4 + 0,026X_1^2 + 0,023X_2^2 + 0,013X_3^2 + 0,016X_4^2; \quad (3)$$

$$Y_4 = 7,554 + 0,413X_1 + 1,155X_2 - 0,154X_3 + 0,063X_4 + 0,356X_1X_2 + 0,081X_1X_3 - 0,306X_1X_4 - 0,344X_2X_3 + 0,144X_2X_4 + 0,144X_3X_4 + 0,261X_1^2 + 0,323X_2^2 + 0,236X_3^2 + 0,174X_4^2. \quad (4)$$

Установлено, что все коэффициенты регрессий значимы с 90 % доверительной вероятностью, а статистические параметры модели адекватны при 1 % уровне значимости.

**Управление комбинированным процессом термомеханической обработки.** Изучение членов, описывающих взаимодействие факторов на многоугольниках предпочтений (рис. 2), позволило определить значимость взаимной корреляции факторов по диаграммам Лоренца (рис. 3), в которых факторы ранжируются по возрастанию. Степень влияния факторов на параметры дала возможность выявить анализ линейных членов по диаграммам Парето (рис. 4).

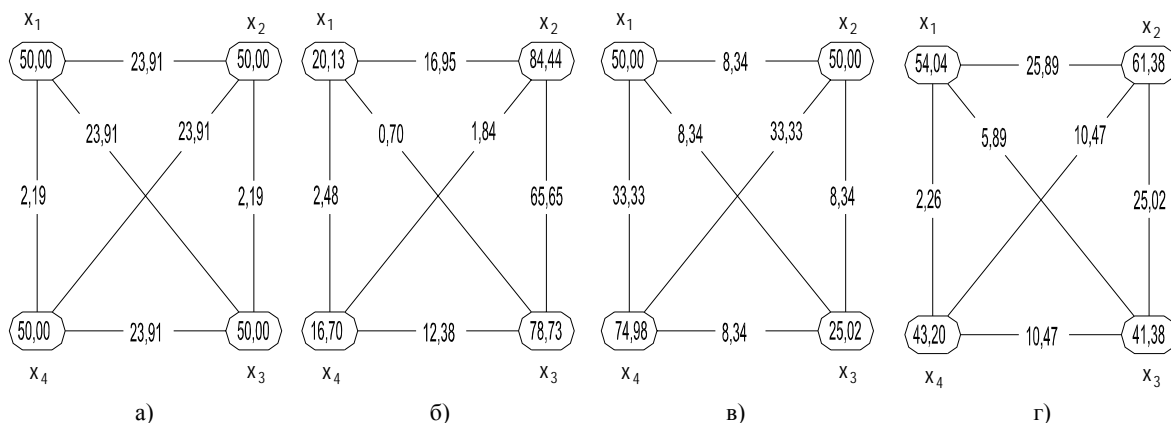


Рис. 2. Многоугольники предпочтений для параметров  $Y_1(a)$ ,  $Y_2(b)$ ,  $Y_3(c)$ ,  $Y_4(d)$  при комбинированной обработке

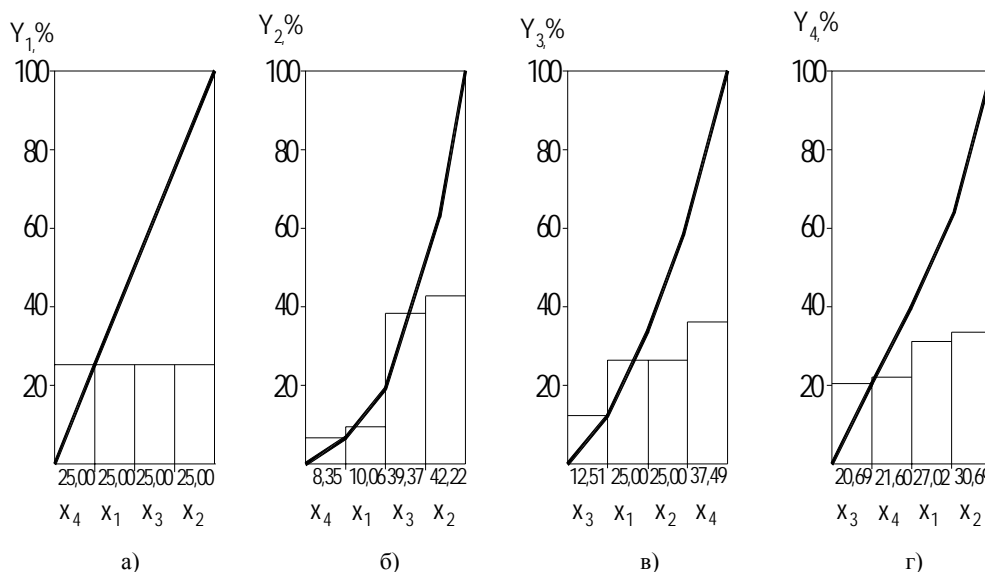


Рис. 3. Диаграммы Лоренца для параметров  $Y_1(a)$ ,  $Y_2(b)$ ,  $Y_3(c)$ ,  $Y_4(d)$  при комбинированной обработке

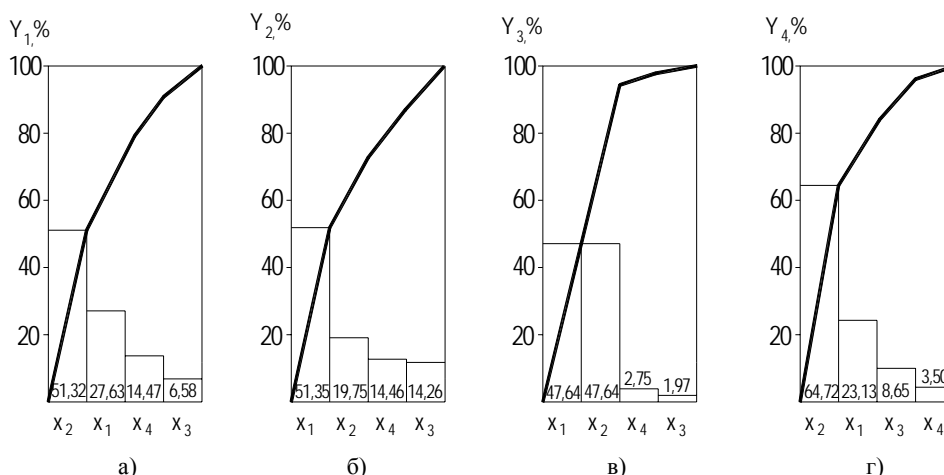


Рис. 4. Диаграммы Парето для параметров  $Y_1(a)$ ,  $Y_2(б)$ ,  $Y_3(в)$ ,  $Y_4(г)$  при комбинированной обработке

С учетом степени влияния на параметры и значимости взаимной корреляции факторы  $X_1, \dots, X_4$  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
$Y_1$	$X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2$	$X_4 = X_1 = X_3 = X_2$
$Y_2$	$X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1$	$X_4 \rightarrow X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$
$Y_3$	$X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_2 = X_1$	$X_3 \rightarrow X_1 = X_2 \rightarrow X_4$
$Y_4$	$X_4 \rightarrow X_3 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2$	$X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2$

Из таблицы 3 следует, что для управления параметрами  $Y_1$  и  $Y_2$  наилучшим образом подходят факторы  $X_1$  и  $X_4$ , а для  $Y_3$  и  $Y_4$  – факторы  $X_2$  и  $X_3$ . Данные, полученные при анализе процесса упрочняющего резания с дополнительным плазменным оплавлением, показывают, что физико-механическими  $Y_1 = HRC$  и  $Y_2 = U_n$  параметрами рационально управлять с помощью термомеханических факторов  $X_1 = I$  и  $X_4 = V$ , а геометрическими параметрами  $Y_3 = Sm_w$  и  $Y_4 = Ra$  – путем рационального размещения инструмента, используя факторы  $X_2 = L$  и  $X_3 = S$  (см. табл. 3).

Для комплексной оптимизации параметров качества и управления комбинированным процессом использовали диаграмму «причины – результат» (рис. 5), для которой в качестве цели рассматривали обобщенную функцию желательности Харрингтона (рис. 6).

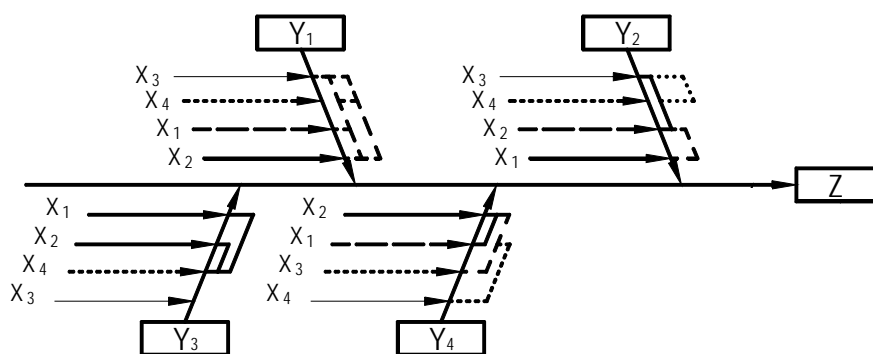


Рис. 5. Диаграмма «причины – результат» для управления комбинированным процессом

Для желательностей составлены шкалы (см. рис. 6) исходя из значимости параметров  $Y_1, \dots, Y_4$  и возможностей их регулирования технологическими факторами  $X_1, \dots, X_4$  согласно диаграмме «причины – результат» (см. рис. 5).

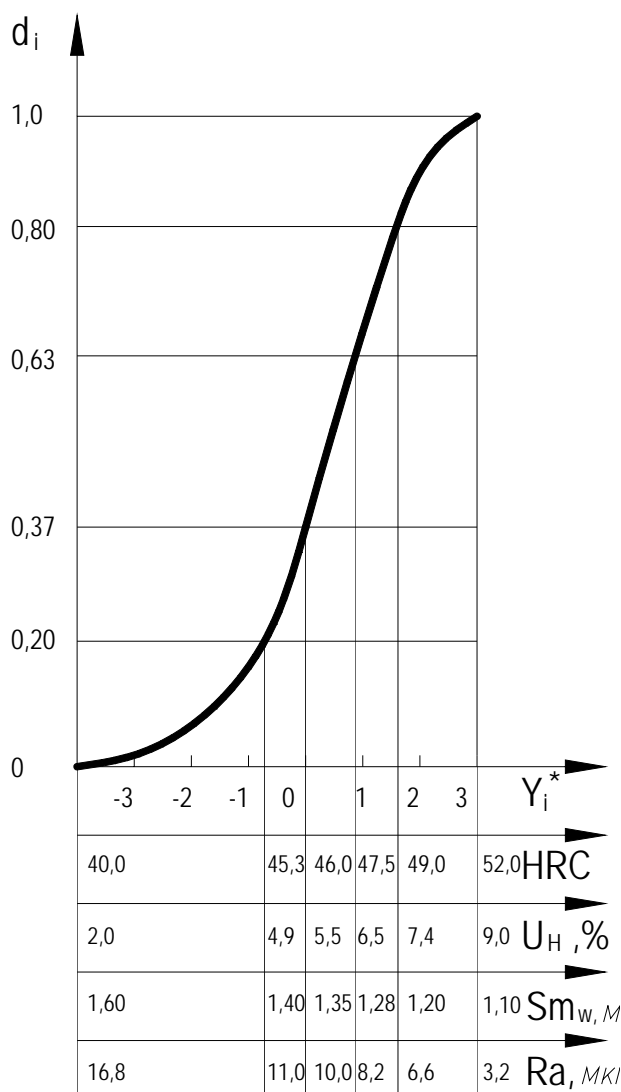


Рис. 6. Функция  $d_i$  и шкалы желательности  $Y_i$  параметров оптимизации комбинированного процесса

Комплексную оптимизацию упрочняющего резания с оплавлением срезаемого слоя, представленного уравнениями (1)...(4), проводили методом спирального координатного спуска по обобщенной функции желательности [11, 12].

Результаты оптимизации дают возможность рекомендовать при глубине резания 2 мм режимы обработки:

-  $I = 60$  А;  $L = 35$  мм;  $S = 0,2$  мм/об;  $V = 2,7$  м/с, для которых функция желательности максимальна ( $Z = 0,88$ ), а параметры качества обрабатываемой поверхности:  $HRC = 53,5$ ;  $U_H = 8$  %;  $Sm_w = 1,2$  мм;  $Ra = 7,7$  мкм.

В соответствии с диаграммой управления (см. рис. 5) для обеспечения оптимального комплекса результатов (см. рис. 6) при упрочняющем резании с предварительным плазменным нагревом следует рекомендовать [10, 12]:

- регулирование интенсивности нагрева, а также скорости движений обработки;
- статистический контроль геометрического  $Ra$  и физико-механического  $HRC$  параметров.

**Заключение.** При использовании структурного анализа комбинированной термомеханической обработки для детализации на SADT-диаграмме технологической операции – упрочняющее резание с предварительным плазменным оплавлением срезаемого слоя – следует разделять группы физико-механических и геометрических параметров качества. Для управления геометрическими параметрами  $Y_3 = Sm_w$  и  $Y_4 = Ra$  следует использовать факторы размещения и движения инструмента  $X_2 = L$  и  $X_3 = S$ , а управления физико-механическими параметрами  $Y_1 = HRC$  и  $Y_2 = U_n$  – термомеханические факторы  $X_1 = I$  и  $X_4 = V$ .

В качестве мероприятий по оперативному управлению процессом следует рекомендовать: регулирование интенсивности нагрева и скорости движений обработки, а также долговременный статистический контроль геометрического  $Ra$  и физико-механического  $HRC$  параметров качества.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Марка, Д. Методология структурного анализа и проектирования / Д. Марка, К. МакГоуэн. – М.: Мета Технологии, 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. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства / А.С. Васильев [и др.]. – М. – Тула: ТулГУ, 2003. – 271 с.
8. Горленко, О.А. Создание систем менеджмента качества в организации / О.А. Горленко, В.В. Мирошников. – М.: Машиностроение, 2002. – 126 с.
9. Управление качеством / В.Н. Корешков [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – 140 с.
10. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
11. Статистический анализ конструктивных элементов и технологических параметров деталей машин / М.Л. Хейфец [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – 112 с.
12. Менеджмент качества предприятий машиностроения / В.Н. Корешков [и др.]. – Минск: Экономика и право, 2003. – 224 с.

Поступила 14.01.2008