

Математическое моделирование обработки высокопрочных сталей

С.Г. Радченко • С.Н. Лапач

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 18 March 2019 / Accepted: 24 March 2019

***Аннотация.** Исследован технологический процесс обработки высокопрочных сталей инструментом из металлокерамических безвольфрамовых твердых сплавов. Факторы процесса включали в себя как параметры технологического процесса (скорость резания, продольная подача, глубина резания, время обработки) так и материал режущего инструмента и обрабатываемый материал. Характеристиками качества технологического процесса выбраны износ реза по задней поверхности и шероховатость обработанной поверхности. Эксперименты проводились по робастному плану, основанному на многофакторных регулярных планах ($3^4 \times 4^2 // 64$). Регрессионные модели построены с помощью программного средства ПРИАМ (планирование, регрессия и анализ моделей). Поскольку для показателя шероховатости поверхности факторное пространство оказалось неоднородным, то оно с помощью нечеткого кластерного анализа было разделено на однородные подпространства, в каждом из которых построена своя модель. Все модели информативны, адекватны и устойчивы. Их использование позволяет разработать технологический процесс в соответствии с требуемыми показателями качества.*

***Ключевые слова:** регрессионный анализ, математическое моделирование, планирование экспериментов, обработка высокопрочных сталей, неоднородность факторного пространства, нечеткий кластерный анализ.*

1. Введение

Изготовление деталей из высокопрочных материалов связано с увеличением трудоемкости их обработки на металлорежущих станках вследствие необходимости значительного снижения скоростей резания. Причинами трудной обрабатываемости высокопрочных сталей являются возникновение при их обработке больших сил и высоких температур в зоне резания, способность металла упрочняться и повышенная склонность к наростообразованию. Поэтому применение вольфрамсодержащих твердых сплавов при обработке высокопрочных сталей не обеспечивает нормативной стойкости, заданной шероховатости обработанной поверхности, не позволяет повысить производительность обработки. Перспективным является применение резцов, оснащенных многогранными неперетачиваемыми пластинками из безвольфрамовых твердых сплавов и режущей металлокерамики.

Для моделирования и оптимизации сложных многофакторных зависимостей используется регрессионный анализ [1–5] и планирование экспериментов [4, 6, 7], которые достаточно широко и давно применяются при моделировании технологических процессов [7–11]. Следует при этом отметить, что в настоящее время, несмотря на многочисленную литературу, в том числе учебную, по применению планирования эксперимента в технологии машиностроения [11–14], исследователи в подавляющем большинстве используют устаревшие и неэффективные для исследования сложных процессов планы эксперимента [11, 14].

2. Постановка задачи

Целью исследования является разработка технологического процесса обработки высокопрочных сталей инструментом из металлокерамических безвольфрамовых твердых сплавов. Проводились сравнительные стойкостные испытания резцов из вольфрамсодержащих твердых сплавов и металлокерамических твердых сплавов, исследовалось влияние режимов резания на шероховатость обработанной поверхности при точении высокопрочных конструкционных и инструментальных сталей.

3. Изложение основного материала исследования

Для получения эмпирических математических моделей используются методы регрессионного анализа и планирования эксперимента. К построению многофакторных регрессионных моделей необходимо подходить системно: процесс должен включать построение плана эксперимента, формализованный выбор структуры модели, устойчивое оценивание коэффициентов модели [2].

В данном исследовании для получения многофакторных статистических моделей \hat{y}_1 и \hat{y}_2 был использован робастный многофакторный план эксперимента $3^4 \times 4^{2/64}$: 4 фактора на 3 уровнях, 2 фактора на 4 уровнях, 64 опыта. При проведении эксперимента каждый опыт повторялся дважды.

Исследовались характеристики качества технологического процесса y_1 – износ резца по задней поверхности (мм), y_2 – шероховатость обработанной поверхности (мкм), в зависимости от влияющих факторов

X_1 – скорость резания, V , м/мин, уровни: 120, 90, 60;

X_2 – продольная подача, S , мм/об, уровни: 0,1; 0,2; 0,3;

X_3 – глубина резания, t , мм, уровни: 0,2; 0,6; 1,0;

X_4 – время обработки, T , мин, уровни: 10, 20, 30;

X_5 – материал режущего инструмента, M_1 , уровни: 0 (ВОК-60), 1 (Силинит), 2 (ВК8), 3 (Т30К4);

X_6 – обрабатываемый материал, M_2 , уровни: 0 (30ХГСА), 1 (ВКС-210), 2 (Х12М), 3 (У8А).

Рабочая матрица исследования технологического процесса обработки высокопрочных сталей, значения уровней факторов и результаты опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочая матрица и результаты экспериментов

Теоретические значения уровней варьируемых факторов		Факторы						Функции			
		Натуральное обозначения факторов						Натуральное обозначения функций			
		V	S	t	T	M_1	M_2	h_3		R_a	
		Формализованное обозначение факторов и натуральные значения их уровней						Формализованное обозначение функций			
1		2						3			
$F_1 \dots F_4$	$F_5 \dots F_6$	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	y_1		y_2	
0	0	120	0,1	0,2	10	0	0	Значения результатов повторных опытов			
1	1	90	0,2	0,6	20	1	1				
2	2	60	0,3	1,0	30	2	2				
–	3	–	–	–	–	3	3	y_{11}	y_{12}	y_{21}	y_{22}
Опыт 1		120	0,1	0,2	10	0	0	0,12	0,15	1,25	1,00
2		90	0,1	0,2	10	2	1	0,50	0,60	8,00	10,00
3		120	0,2	0,6	30	0	3	0,30	0,38	2,50	3,20
4		120	0,2	1,0	30	2	2	0,52	0,50	8,00	6,30
5		60	0,1	0,6	20	3	3	0,40	0,38	5,00	6,30
6		90	0,2	1,0	10	1	2	0,15	0,20	2,50	3,20
7		60	0,3	0,2	20	3	0	0,30	0,33	10,00	10,00
8		90	0,3	0,6	20	1	1	0,32	0,35	12,50	10,00
9		120	0,1	0,2	30	1	1	0,40	0,45	6,30	5,00
10		90	0,2	0,2	30	3	0	0,35	0,40	2,50	3,20
11		120	0,3	1,0	10	1	2	0,18	0,20	5,00	4,00
12		120	0,3	0,6	10	3	3	0,40	0,30	10,00	8,00
13		60	0,1	1,0	20	2	2	0,40	0,45	5,00	6,30
14		90	0,1	0,6	20	0	3	0,20	0,25	0,63	0,50
15		60	0,2	0,6	20	2	1	0,70	0,80	16,00	16,00
16		90	0,2	0,2	10	0	0	0,10	0,12	2,50	2,00
17		120	0,1	0,6	30	3	2	0,50	0,55	5,00	4,00
18		120	0,2	0,2	30	1	3	0,40	0,50	5,00	5,00
19		120	0,3	1,0	10	3	1	0,45	0,30	20,00	20,00
20		90	0,3	0,6	10	1	0	0,25	0,20	6,30	5,00

1	2						3			
21	60	0,1	1,0	20	0	1	0,30	0,25	2,50	2,00
22	90	0,1	0,6	20	2	0	0,32	0,35	4,00	3,20
23	60	0,2	0,2	10	0	2	0,20	0,15	1,25	1,60
24	90	0,2	0,2	20	2	3	0,50	0,40	5,00	6,30
25	120	0,1	0,2	10	2	3	0,20	0,24	2,50	2,00
26	120	0,1	0,6	10	0	2	0,18	0,20	1,25	0,80
27	120	0,2	0,6	30	2	0	0,30	0,35	5,00	6,30
28	90	0,2	1,0	30	0	1	0,38	0,40	2,50	3,20
29	60	0,1	0,6	10	1	0	0,15	0,20	1,25	1,60
30	90	0,2	1,0	20	3	1	0,35	0,40	5,00	6,30
31	60	0,3	0,2	20	1	3	0,30	0,35	5,00	6,30
32	90	0,3	0,2	20	3	2	0,42	0,45	4,00	5,00
33	120	0,2	0,6	20	0	3	0,30	0,35	1,60	2,00
34	90	0,1	0,2	20	2	2	0,25	0,25	4,00	5,00
35	120	0,3	1,0	20	0	0	0,20	0,25	2,50	3,20
36	120	0,3	0,6	10	2	1	0,50	0,58	20,00	16,00
37	60	0,1	1,0	30	3	0	0,35	0,40	2,50	2,00
38	90	0,1	0,6	30	1	1	0,40	0,50	5,00	4,00
39	60	0,2	0,2	10	3	3	0,40	0,45	10,00	8,00
40	90	0,2	0,2	10	1	2	0,28	0,30	2,50	2,50
41	120	0,1	0,2	20	1	2	0,38	0,42	2,50	2,00
42	90	0,1	0,6	10	3	3	0,20	0,25	2,50	2,50
43	120	0,2	0,6	20	1	1	0,35	0,45	5,00	5,00
44	120	0,2	1,0	20	3	0	0,40	0,50	5,00	5,00
45	60	0,2	0,6	10	2	1	0,30	0,34	10,00	10,00
46	90	0,1	1,0	10	0	0	0,15	0,12	1,25	1,25
47	60	0,3	0,2	30	2	2	0,50	0,60	8,00	10,00
48	90	0,3	0,2	30	0	3	0,30	0,35	2,50	2,00
49	120	0,1	0,2	10	3	1	0,40	0,50	5,00	6,30
50	120	0,1	0,2	20	1	0	0,28	0,32	2,50	2,50
51	120	0,2	0,6	20	3	2	0,35	0,35	4,00	4,00
52	90	0,2	1,0	20	1	3	0,45	0,40	4,00	3,20
53	60	0,2	0,6	10	0	2	0,25	0,15	1,25	1,00
54	90	0,1	1,0	10	2	3	0,30	0,35	5,00	6,30
55	60	0,3	0,2	30	0	1	0,35	0,30	3,20	3,20
56	90	0,3	0,6	30	2	0	0,50	0,40	5,00	5,00
57	120	0,2	0,2	20	2	0	0,35	0,40	3,20	3,20
58	120	0,1	0,2	20	0	1	0,30	0,45	2,50	3,20
59	120	0,3	1,0	10	2	3	0,40	0,45	8,00	8,00
60	90	0,3	0,6	20	0	2	0,20	0,25	2,50	2,00
61	60	0,1	1,0	30	1	3	0,30	0,35	2,50	2,00
62	90	0,1	0,6	30	3	2	0,50	0,40	2,50	3,20
63	60	0,2	0,6	10	1	0	0,30	0,20	2,50	3,20
64	90	0,2	0,2	10	3	1	0,40	0,45	8,00	10,00

Обработка результатов эксперимента и построение моделей выполнено с использованием ПС ПРИАМ [15].

По отклику \hat{y}_1 получена модель:

$$\hat{y}_1 = 0,349921 + 0,0800781x_5 + 0,0629403x_4 + 0,052999u_6 - 0,0342215z_5 - 0,0233921u_5 - \\ - 0,0305839z_1z_2z_5 + 0,0303763u_5z_6 + 0,0241673x_2z_6 + 0,0313203z_1x_2z_4 - 0,0182782z_2z_6$$

где

$$x_1 = 0,0296296(X_1 - 93,75); z_1 = 2,05664(x_1^2 + 0,153846x_1 - 0,481481); x_2 = 8,88889(X_2 - 0,1875); \\ z_2 = 2,05664(x_2^2 - 0,153846x_2 - 0,481481); \\ x_3 = 2,22222(X_3 - 0,55); x_4 = 0,0888889(X_4 - 18,75); z_4 = 2,05664(x_4^2 - 0,153846x_4 - 0,481481); \\ x_5 = 0,666667(X_5 - 1,5); z_5 = 2,25(x_5^2 - 0,555556); u_5 = 3,75(x_5^3 - 0,911111x_5); \\ x_6 = 0,666667(X_6 - 1,5); z_6 = 2,25(x_6^2 - 0,555556); u_6 = 3,75(x_6^3 - 0,911111x_6).$$

Полученная модель \hat{y}_1 адекватна, информативна и устойчива как структурно, так и вычислительно, что видно из статистических характеристик, приведенных в табл. 2.

Наиболее сильно влияющие факторы: X_5 (материал режущего инструмента) – объясняет 33,2% общего рассеивания; X_4 (время обработки) – 18,1% и X_6 (обрабатываемый материал) – 15,9%.

Таблица 2

Статистические характеристики модели \hat{y}_1

Параметры статистического анализа		Условные обозначения	Значения параметров \hat{y}_1
Проверка гипотезы о воспроизводимости результатов эксперимента	Дисперсия воспроизводимости	$S_{\text{восп}}^2$	0,00218672
	Среднеквадратичное отклонение	$S_{\text{восп}}$	0,0467624
	Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости	$f_{\text{восп1}}$	64
		$f_{\text{восп2}}$	1
	Экспериментальное значение G -критерия	$G_{\text{эксп}}$	0,080386
	Критическое значение G -критерия	$G_{\text{крит}}$	0,165178
Уровень значимости	α	0,05	
Проверка гипотезы об адекватности модели	Дисперсия адекватности	$S_{\text{ад}}^2$	0,00328477
	Экспериментальное значение F -критерия	$F_{\text{эксп}}$	1,50214
	Критическое значение F -критерия	$F_{\text{крит}}$	1,55561
	Число степеней свободы для адекватности	$f_{\text{ад1}}$	16
		$f_{\text{ад2}}$	47
	Уровень значимости	α	0,05
Адекватность модели	адекватна		
Анализ полученной модели на информативность	Коэффициент множественной корреляции	R	0,910348
	Число степеней свободы для коэффициентов модели	$f_{k'}$	16
	Число степеней свободы для остаточной суммы квадратов	$f_{\text{ост}R}$	111
	Экспериментальное значение F -критерия	$F_{\text{эксп}}$	14,2141
	Критическое значение F -критерия	$F_{\text{крит}}$	1,73542
	Уровень значимости	α	0,05
	Критерий Бокса и Веса	γ	2
	Информативность модели	хорошая	

Окончание табл. 2

Параметры статистического анализа	Условные обозначения	Значения параметров \hat{y}_1
Число обусловленности	$\text{cond}(X^T X)$	1,81985
Среднее абсолютных величин относительных погрешностей аппроксимации, %	$ \bar{e}_{\text{отно}} $	12,04
Среднее абсолютных величин абсолютных погрешностей аппроксимации	$ \bar{e}_u $	0,0380044
Доля рассеяния, объясняемая моделью	$Q_{\hat{y}}$	0,8287

Характер зависимости \hat{y}_1 от факторов X_1 и X_2 иллюстрируется маргинальной поверхностью отклика (рис. 1), при этом остальные факторы зафиксированы на таких уровнях: $X_3 = 0,2$; $X_4 = 10,0$; $X_5 = 0$; $X_6 = 0$.

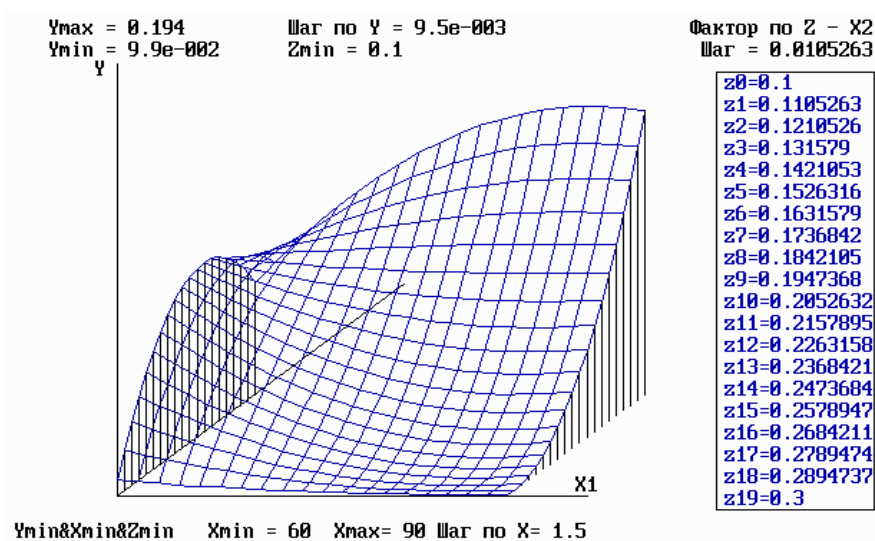


Рис. 1. Маргинальная поверхность отклика для \hat{y}_1

По второму отклику \hat{y}_2 не удалось построить адекватную модель, при этом все варианты полученных моделей были информативными. Это служит косвенным признаком неоднородности факторного пространства [16, 17]. Подтверждается наличие сложностей и особенностей построения регрессионных моделей для процессов резания по сравнению со стандартным подходом, о которых впервые отмечено в [16].

В связи с этим с помощью нечеткого кластерного анализа [18] были выполнены работы по выделению гипотетических однородных областей методами, специально разработанными для использования с регрессионным анализом [19–21].

Было выполнено разделение на 2, 4, 8 и 16 кластеров. Окончательный выбор количества кластеров произведен из анализа скорости изменения показателей качества разбиения [19, 21].

В данном случае оптимальное число кластеров равно 8, что хорошо видно на рис. 2 и рис. 3.

Внутригрупповая дисперсия

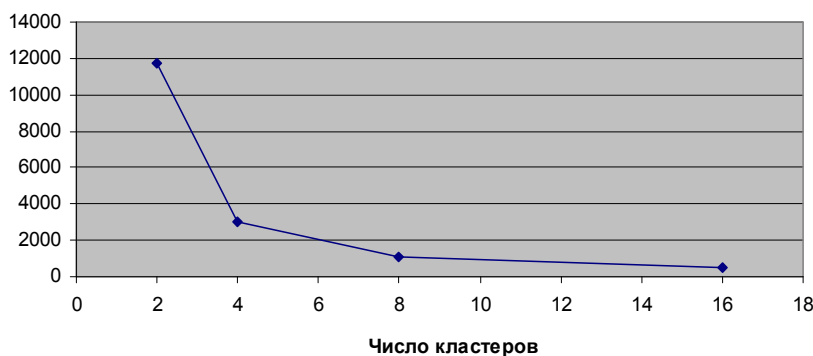


Рис. 2. Зависимость внутригрупповой дисперсии от количества кластеров

Качество разбиения

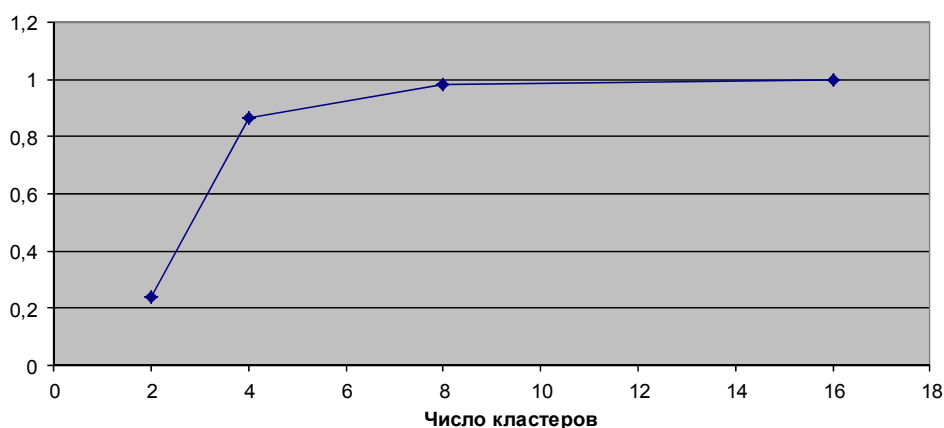


Рис. 3. Зависимость качества разбиения от количества кластеров

Для обеспечения дальнейшей работы выполнено определение факторов-дискриминаторов, т. е. факторов, позволяющих однозначно разделить выборку на кластеры и соответственно значений этих факторов определяющих это разделение. Такими переменными оказались X_1 и X_4 . В табл. 3 приведены значения сочетаний переменных, обеспечивающих соотнесение к определенному кластеру. Разделить кластеры 1 и 8 не представляется возможным: они пересекаются, и в дальнейшем будут рассматриваться как один кластер.

Таблица 3

Дискриминирующие переменные и их значения

Скорость резания	Время обработки	Частота совпадения	Кластер номер	Номера опытов
90	30	6	2	10, 28, 38, 48, 56, 62
120	10	9	3	1, 11, 12, 19, 25, 36, 36, 49, 59
90	10	9	4	2, 6, 16, 20, 40, 42, 46, 54, 64
60	10	6	5	23, 29, 39, 45, 53, 63
120	30	6	6	3, 4, 9, 17, 18, 27, 33, 35, 41, 43, 44, 50, 51, 57, 58
120	20	9		
60	20	6	7	5, 7, 13, 15, 21, 31, 37, 47, 55, 61
60	30	4		
90	20	9	1, 8	8, 22, 24, 30, 32, 34, 14, 52, 60

В каждом из кластеров построена регрессионная модель \hat{y}_2 (табл. 4). Анализ структуры моделей, построенных в различных кластерах (табл. 5), дополнительно подтверждает предположение о неоднородности пространства. Можно видеть, что структура (состав регрессоров) моделей различна вплоть до разного состава не только регрессоров, но и факторов.

Статистические характеристики моделей \hat{y}_2 приведены в табл. 6. Все модели адекватны, информативны и имеют высокую вычислительную устойчивость.

Анализ силы влияния отдельных факторов на шероховатость обработанной поверхности y_2 по кластерам приводится в табл. 7.

Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что наибольшее влияние на величину износа резца по задней поверхности y_1 оказывает время обработки и материал обрабатываемого образца. На шероховатость обработанной поверхности y_2 – величина продольной подачи и марка обрабатываемого материала. Для каждого материала режущего инструмента определены рекомендуемые режимы резания. Наилучшие значения критериев качества y_1 и y_2 обработки сталей получены для режущего инструмента из металлокерамики ВОК–60.

Регрессионные модели \hat{y}_2 по однородным подобластям факторного пространства

Обозначение кластера	Модель \hat{y}_2	Преобразования
C2	$3,38333 - 1,36667z_5$	$x_5 = 0,666667(X_5 - 1,5); z_5 = 1,6875(x_5^2 - 0,703704)$
C3	$9,21112 + 5,10988x_2 +$ $+6,15453z_3z_5 + 2,99091x_3z_5 +$ $+2,69648x_2z_6$	$x_2 = 9(X_2 - 0,211111); x_3 = 2,5(X_3 - 0,6);$ $z_3 = 1,5(x_3^2 - 0,666667); x_5 = 0,5625(X_5 - 1,77778);$ $z_5 = 2,83355(x_5^2 + 0,301683x_5 - 0,40625);$ $z_6 = 1,74232(x_6^2 + 0,0901163x_6 - 0,335938);$ $x_6 = 0,5625(X_6 - 1,77778).$
C4	$4,72424 + 8,77236z_3u_6 +$ $+1,8885x_5$	$x_3 = 2,25(X_3 - 0,555556);$ $z_3 = 1,59465(x_3^2 - 0,170968x_3 - 0,62);$ $x_5 = 0,642857(X_5 - 1,44444);$ $x_6 = 0,6(X_6 - 1,33333);$ $z_6 = 2,41935(x_6^2 - 0,133333x_6 - 0,48);$ $u_6 = 5,0583 \left(\begin{array}{l} x_6^3 - 0,284746x_6^2 - \\ -0,722034x_6 + 0,072678 \end{array} \right).$
C5	$3,80793 + 5,72159z_5z_6 -$ $-2,85445u_5u_6$	$x_5 = 0,545455(X_5 - 1,16667);$ $z_5 = 2,65011(x_5^2 - 0,283814x_5 - 0,338843);$ $x_6 = 0,6(X_6 - 1,33333);$ $z_6 = 1,90972(x_6^2 - 0,0363636x_6 - 0,44);$ $u_6 = 3,85802(x_6^3 - 0,36x_6^2 - 0,696x_6 + 0,1424).$
C6	$3,8042 + 3,04491u_5u_6 +$ $+1,19825x_5$	$x_5 = 0,6(X_5 - 1,33333);$ $u_5 = 4,15381 \left(\begin{array}{l} x_5^3 - 0,219195x_5^2 - 0,718142x_5 \\ + 0,0175851 \end{array} \right);$ $x_6 = 0,6(X_6 - 1,33333);$ $u_6 = 4,46245 \left(\begin{array}{l} x_6^3 - 0,318156x_6^2 - 0,709971x_6 \\ + 0,102824 \end{array} \right).$
C7	$5,13996 - 15,7993z_2u_6 -$ $-2,66344x_4z_6 + 1,17788x_2z_6 +$ $+1,36912x_5 + 0,899371x_4x_6$	$x_2 = 9,09091(X_2 - 0,19);$ $z_2 = 1,34613(x_2^2 - 0,171604x_2 - 0,735537);$ $x_4 = 0,166667(X_4 - 24); x_5 = 0,588235(X_5 - 1,7);$ $x_6 = 0,625(X_6 - 1,6);$ $z_6 = 2,03487(x_6^2 + 0,0241935x_6 - 0,484375);$ $u_6 = 3,79259 \left(\begin{array}{l} x_6^3 + 0,225x_6^2 - 0,784375x_6 - \\ - 0,0972656 \end{array} \right).$
C1,8	$4,97991 - 3,25417z_3u_5 +$ $+2,24733u_5 - 1,82366x_6$	$x_3 = 2,25(X_3 - 0,555556);$ $z_3 = 2,26337(x_3^2 - 0,118182x_3 - 0,44);$ $x_5 = 0,642857(X_5 - 1,55556);$ $u_5 = 3,55495 \left(\begin{array}{l} x_5^3 + 0,0504202x_5^2 - 0,832833x_3 + \\ + 0,0229806 \end{array} \right);$ $x_6 = 0,529412(X_6 - 1,88889).$

Таблица 5

Структура моделей \hat{y}_2 по кластерам

Условное обозначение кластера	Условное обозначение факторов, входящих в модель				
	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
	Наличие факторов в модели				
C2	Нет	Нет	Нет	+	Нет
C3	+	+	Нет	+	+
C4	Нет	+	Нет	+	+
C5	Нет	Нет	Нет	+	+
C6	Нет	Нет	Нет	+	+
C7	+	Нет	+	+	+
C1,8	Нет	+	Нет	+	+

Таблица 6

Результаты статистического анализа математических моделей \hat{y}_2 по кластерам

Параметры статистического анализа параметров		Условные обозначения	Значения для модели						
			C2	C3	C4	C5	C6	C7	C1,8
1		2	3	4	5	6	7	8	9
Проверка гипотезы о воспроизводимости результатов эксперимента	Дисперсия воспроизводимости	$S_{\text{восп}}^2$	0,2267	1,2892	0,6733	0,3998	0,305	0,491	0,7321
	Среднеквадратичное отклонение	$S_{\text{восп}}$	0,4761	1,1354	0,8206	0,6323	0,5523	0,7007	0,8556
	Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости	$f_{\text{восп1}}$	6	9	9	6	15	10	9
		$f_{\text{восп2}}$	1	1	1	1	1	1	1
	Экспериментальное значение G -критерия	$G_{\text{эксп}}$	0,3676	0,6895	0,3300	0,8338	0,3158	0,4073	0,4743
	Критическое значение G -критерия	$G_{\text{крит}}$	0,7807	0,6385	0,6385	0,7807	0,4709	0,6020	0,6385
Уровень значимости	α	0,05							
Проверка гипотезы об адекватности модели	Дисперсия адекватности	$S_{\text{ад}}^2$	0,988	3,0444	1,3629	0,4462	0,5533	0,5628	1,4230
	Экспериментальное значение F -критерия	$F_{\text{эксп}}$	2,2954	2,3615	2,024	1,116	1,8143	1,1463	1,9438
	Критическое значение F -критерия	$F_{\text{крит}}$	6,1631	3,6331	3,3738	4,7571	2,4753	3,4781	3,4817
	Число степеней свободы для адекватности	$f_{\text{ад1}}$	1	4	2	2	2	5	3
		$f_{\text{ад2}}$	4	4	6	3	12	4	5
	Уровень значимости	α	0,05						
Адекватность модели		Адекватна							
Анализ полученной модели на информативность	Коэффициент множественной корреляции	R	0,9665	0,9582	0,9363	0,9830	0,8836	0,9613	0,9391
	Число степеней свободы для коэффициентов модели	$f_{k'}$	1	4	2	2	2	5	3
	Число степеней свободы для остаточной суммы квадратов	$f_{\text{ост}R}$	10	13	15	9	27	14	14
	Экспериментальное значение F -критерия	$F_{\text{эксп}}$	56,743	11,2289	21,34	42,869	21,365	9,7466	12,454
	Критическое значение F -критерия	$F_{\text{крит}}$	4,965	3,1791	3,6823	4,2565	3,3541	2,9583	3,3439
	Уровень значимости	α	0,05						
	Критерий Бокса и Веса	γ	0	0	1	1	1	0	1
Информативность модели		Низкая	Низкая	Удовл.	Удовл.	Удовл.	Низкая	Удовл.	

Окончание табл.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число обусловленности	$\text{cond}(X^T X)$	1	1,114	1,736	1	1,013	1,352	1,110
Среднее абсолютных величин относительных погрешностей аппроксимации	$ \bar{\epsilon}_{\text{отн}} $	7,72	21,38	28,76	18,37	15,65	6,02	42,83
Среднее абсолютных величин абсолютных погрешностей аппроксимации	$ \bar{\epsilon}_i $	0,23	0,86	0,82	0,40	0,53	0,33	0,69
Доля рассеяния, объясняемая моделью	Q_j	0,9341	0,9182	0,8767	0,9662	0,7807	0,9241	0,8820

Таблица 7

Сила влияния отдельных факторов по кластерным моделям \hat{y}_2

Кластер	Переменная	Доля влияния (%)
C2	глубина резания	93,41
C3	скорость резания	50,07
	продольная подача + глубина резания (взаимодействие)	38,69
	скорость резания + время обработки (взаимодействие)	3,05
C4	продольная подача + глубина резания (взаимодействие)	66,77
	глубина резания	20,91
C5	глубина резания + время обработки (взаимодействие)	96,72
C6	время обработки + материал режущего инструмента (взаимодействие)	51,23
	время обработки	26,85
C7	скорость резания + материал режущего инструмента (взаимодействие)	71,6
	глубина резания + материал режущего инструмента (взаимодействие)	18,57
	время обработки	3,18
C1,8	продольная подача + глубина резания (взаимодействие)	49,24
	глубина резания	27,2
	время обработки	11,75

Выводы

1. Построенные многофакторные математические модели описывают технологический процесс обработки высокопрочных сталей инструментом из металлокерамических безвольфрамовых твердых сплавов. Модели информативны, адекватны и устойчивы.
2. Полученные модели позволяют разрабатывать оптимальный технологический процесс под обрабатываемый материал и материал режущего инструмента.
3. Подтверждено наличие сложностей и особенностей построения регрессионных моделей для процессов резания по сравнению со стандартным подходом, о которых впервые отмечено в [16].
4. Представленная технология построения регрессионных моделей позволяет обеспечивать получение многофакторных математических моделей технологических процессов при сложной и даже разрывной форме поверхности отклика.
5. Для каждого материала режущего инструмента определены рекомендуемые режимы резания. Наилучшие значения критериев качества y_1 и y_2 обработки сталей получены для режущего инструмента из металлокерамики ВОК-60.
6. Как развитие работы необходимо разрабатывать специальные методы и соответствующее программное обеспечение для автоматизации многокритериальной оптимизации при разрывной области факторного пространства.

Математичне моделювання обробки високоміцних сталей

С.Г. Радченко, С.Н. Лапач

Анотація. Досліджено технологічний процес обробки сталей високої міцності інструментом з металокерамічних безвольфрамових твердих сплавів. Фактори процесу включають як параметри технологічного процесу (швидкість різання, повздовжня подача, глибина різання, час обробки) так і оброблювальний матеріал і матеріал ріжучого інструмента. Характеристиками якості технологічного процесу вибрані зношування різця по задній поверхні і шорсткість обробленої поверхні. Експерименти виконувалися за робастним планом, побудованому на основі багатфакторного регулярного плану ($3^4 \times 4^2 / 64$). Побудова регресійних моделей виконана з використанням програмного засобу ПРІАМ (планування, регресія і аналіз моделей). Оскільки для показника шорсткості поверхні факторний простір виявився неоднорідним, то він за допомогою нечіткого кластерного аналізу був розділений на однорідні підобласті, в кожній із яких була побудована своя

модель.. Всі моделі інформативні, адекватні і стійкі. Їх використання дозволяє розробку оптимального технологічного процесу відповідно до вибраних показників якості.

Ключові слова: регресійний аналіз, математичне моделювання, планування експериментів, обробка високоміцних сталей, неоднорідність факторного простору, нечіткий кластерний аналіз.

Mathematical modeling of high-strength steel processing

S.G. Radchenko, S.M. Lapach

Abstract. In the work, a study was conducted of the technological process of processing high-strength steels with a tool made of metal-ceramic, tungsten-free hard alloys. The study took into account both the process parameters (cutting speed, longitudinal feed, cutting depth, processing time) and the material being processed and the material of the cutting tool. As indicators of the quality of the technological process, the wear of the tool on the back surface and the roughness of the machined surface are chosen. For the experiment, a robust plan was built based on multifactorial regular plans ($3^4 \times 4^2 // 64$). Due to the fact that the factor space for surface roughness turned out to be inhomogeneous, it was divided into homogeneous subspaces using fuzzy cluster analysis, each of which had its own model. All regression models are constructed using the PRIAM software tool (design, regression, and model analysis), which provides automatic generation of the model structure. The constructed models satisfy the requirements of adequacy, information content, structural and computational stability. The use of these models allows both to design a technological process with specified properties, and to analyze the phenomena occurring during this.

Keywords: regression analysis, mathematical modeling, design experiments, fuzzy cluster analysis, processing of high-strength steels, factor space heterogeneity.

References

- Greene William H. Econometric analysis. Fours Edition –New Jersey: Pearson Education Company, 2016.
- Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа – К.: «Корнійчук», 2011. – 376 с.
- Draper Norman R., Smith Harry. Applied Regression Analysis Third Edition – New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- Лапач С.Н., Чубенко А.В., Бабич П.Н. Статистика в науке и бизнесе. – К.: Морион, 2002, – 640 с.
- Carlberg C. Regression Analysis Microsoft Excel – Indianapolis: Pearson Education, Inc, 2016.
- Математическая теория планирования эксперимента / Под. ред. Ермакова С.М. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1983. – 392 с.
- Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – К.: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.
- Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.
- Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
- Уфимычев Ю.И., Михайлов С.К., Святкин Б.К., Прохоров И.И. Регрессионный анализ качества сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
- Штерензон В. А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. – 66 с. <http://www.rsvpu.ru/filedirectory/3468/shterenzon.pdf>
- Планирование, организация и проведение научных исследований в машиностроении: [учебное пособие для вузов] / А.И. Барботько, В. А. Кудинов, П. А. Понкратов, А. А. Барботько. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2013. – 499 с.
- Моргунов А.П., Ревина И.В. Планирование и обработка результатов эксперимента: учеб. пособие: [для вузов].– Омск: Издательство ОмГТУ, 2005. – 300 с.
- Морозов Е.А. Исследование свойств твердосплавного внутреннего покрытия, полученного лазерной наплавкой // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №2-2. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22828>
- Лапач С.Н., Радченко С.Г., Бабич П.Н. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ) / Программные продукты Украины: каталог. – К., 1993. – С. 24–27.
- С.М.Лапач Проблеми побудови регресійних моделей процесів різання металів / Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. 2014, №3(72). С. 40–47.
- Лапач С.Н., Радченко С.Г. Основные проблемы построения регрессионных моделей // Математичні машини і системи. – 2012. – №4. – С. 125–133.
- Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
- Лапач С.Н., Радченко С.Г. Регрессионный анализ в условиях неоднородности факторного пространства // Математичні машини і системи, 2016, № 3. – С. 55–63.
- Лапач С.М. Визначення оптимальної кількості кластерів // Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2014: IX міжнародна науково-практична конференція (м. Київ – с. Жукін, 23 – 27 червня 2014 р.). – С. 272 – 275.
- Лапач С.М. Кластерний аналіз при визначенні однорідних областей факторного простору в регресійному аналізі / П'ятнадцята міжнародна конференція ім. акад. Михайла Кравчука 15-17 травня 2014 р. Київ: Матеріали конф. Т.3. Теорія ймовірностей та математична статистика. –К.: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 82–84.