количества опытов (с учетом параллельных)

$$N = 3 \cdot 8 = 24 .$$

Выводы

1. При обработке жаропрочной стали Х12Н20Т3Р (ЭИ696) методами факторного и симплексного планирования получены близкие значения углов, соответствующих максимальной стойкости фрезы

$$T_{фак} = 61 \text{ мин при } \alpha = 16^{\circ} \ \gamma = 3,7^{\circ};$$
$$T_{сим} = 65 \text{ мин при } \alpha = 18^{\circ} \ \gamma = 11,5^{\circ}.$$

Задний угол оказывает на стойкость инструмента большее влияние, чем передний угол.

2. Симплексное планирование эксперимента рационально поскольку сокращает количество опытов по сравнению с факторным.

В.Д. Шишков, Е.С. Скородумова

РЕЖУЩИЕ СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТЕРМООБРАБОТАННОЙ СТАЛИ 18Х2Н4ВА

В энергетическом машиностроении для ответственных деталей дизелей широко применяется сталь 18Х2Н4ВА, которая подвергается фрезерованию в термообработанном состоянии при твердости HRC 38 - 42 . Применение фрез из стандартной быстрорежущей стали P18 не обеспечивает достаточно высокой производительности. В связи с этим кафедрой " Технология машиностроения " завода - втуза при ЛМЗ им. XXII съезда КПСС совместно с Ленинградским заводом " Звезда" им. К.Е. Ворошилова были проведены сравнительные исследования режущих свойств различных марок быстрорежущих сталей с целью определения оптимального материала для концевых фрез.

Фрезерование образцов из стали 18Х2Н4ВА осуществлялось на вертикально-фрезерном станке 6А12П однозубыми концевыми фрезами диаметром 40 мм с механическим креплением пластин. Геометрия заточки пластин во всех опытах была одинаковой : $\gamma = 0^{\circ}$; $\alpha = 20^{\circ}$; $\omega = 0^{\circ}$; $\varphi_1 = 10^{\circ}$, $\alpha_1 = 10^{\circ}$. Исследование проводилось при трех скоростях резания: 32, 40 и 50 м/мин. Остальные условия опытов сохранялись постоянными: S_z = 0,1 мм/зуб, t = 5 мм, В = 5 мм (фрезеровался уступ). Работа велась без охлаждения при встречной подаче.

Стойкость определялась при критерии затупления по задней поверхности зуба, равном 0,8 мм.

Для исследования были отобраны 14 марок инструментальных материалов. Термообработка проводилась согласно рекомендациям Ю.А. Геллера [1] и А.Н. Попандопуло [2]. Марки инструментальных материалов и режимы термообработки приведены в табл.1. Там же указана твердость после термообработки.

Таблица 1

Марки инструментальных материалов и режимы термообработки

Марка стали	Температура, град С		Твердость HRC
	закалка	отпуск[x]	
Р 18	1270-1290	550-570	62-63
Р 12	1225-1245	550-570	62-63
Р 9	1220-1240	550-570	61-62
Р9К5	1220-1240	560-580	62-63
Р6М5	1210-1230	550-570	62-63
Р9М4К8	1215-1235	550-570	62-64
Р9Ф4К8М	1220-1250	560-580	62-64
Р6М4К12	1210-1230	550-570	65-66
ЭП 379	1240-1260	550-570	63-64
ЭП 657	1220-1250	560-580	63-64
ЭП 658	1210-1240	560-580	63-64
ЭП 733	1200-1220	550-570	62-64
ЭП 734	1200-1220	550-570	62-64
Р14М7К25	1270-1290	600-610	67-68

[x] Для всех сталей, кроме Р9М4К8, отпуск трехкратный по 1 ч, для стали Р9М4К8 - четырехкратный по 1 ч.

Результаты опытов приведены в табл.2

Таблица 2

Марка стали	Скорость резания V, м/мин		
	32	40	50
Р I8	I2,5 I3	6,5 9,5	3 5
Р I2	4I 27 26	6 I0,5 I2	I3 9 9
Р 9	I9 25	I3,5 2I,5	4,5 4
Р9К5	I8 I5	I3 8	3 I
Р6М5	25 30,5	7 9,5 I5	6 6,5
Р9М4К8	4I I49,5 96	40,5 43	I5,5 I2
Р9Ф4К8М	44,5 24,5 37,5	8 I3 35,5 38,5	9,5 9,5 I2
Р6М4КI2	44,5 32,5	II,5 6,5	2,5 5
ЭП 379	46,5 34 95,5	22,5 48,5 23,5	8,5 9,5
ЭП 657	46,5 20 63	26,5 23,5	II,5 I0
ЭП 658	38,5 66,5 I28	I7,5 42 32	I9 22,5
ЭП 733	I8,5 94,5 36 37 36	I4 8 I9 7	7 4
ЭП 734	2I,5 23,5 4I,5 29,5	22,5 23,5	7,5 8
РI4М7К25	I88,5 I63	93 98	44,5 4I,5

По результатам опытов выводились зависимости стойкости от скорости резания

$$T = \frac{C}{V^m} \qquad (\text{I})$$

Для определения величин C и m в формуле (I) использовался метод наилучших линейных оценок [3]. Для этого уравнение (I) приводилось путем логарифмирования к линейному виду

$$y = \theta_1 + \theta_2 x, \qquad (2)$$

где

$$y = \lg T;\ x = \lg V;\ \theta_1 = \lg C;\ \theta_2 = m.$$

Из табл. 2 видно, что в некоторых случаях опыты на одинаковом режиме повторялись по 3-4 раза (это было необходимо, когда в первых двух опытах имелось резкое расхождение в стойкости). Если имелись резко выпадающие точки, то их проверяли на возможность отбрасывания по критерию падающие точки, то их проверяли на возможность отбрасывания по критерию Стьюдента [4]. Если y_1, y_2, y_3 – логарифмы стойкости и y_1 резко отличается от y_2 и y_3, то для проверки достоверности этой точки определяется среднее значение y_2 и y_3 ($\bar{\bar{y}}$)

$$\sigma^2 = 2(\bar{\bar{y}} - y_2)^2$$

и далее вычисляется критерий Стьюдента $t = \frac{\bar{\bar{y}} - y_1}{\sqrt{\sigma^2}}$.

Рассчитанное значение t сравнивается с табличным при уровне значимости p = 0,05 и числе степеней свободы $f = n$ – I (– количество опытов, по которым рассчитывается $\bar{\bar{y}}$). Если $t > t$ табл., то точка y, отбрасывается, если $t < t$ табл., то ее отбрасывать нельзя.

Для получения диагональных матриц при определении коэффициентов по методу наилучших линейных оценок, полученных обычным способом [5], дисперсии стойкости σ_i^2 при различных значениях скорости резания V во всех опытах нужно усреднить. Однако это усреднение можно производить только при однородности усредняемых дисперсий. Однородность дисперсий проверяется по критерию Фишера [5], расчетное значение которого определяется как отношение наибольшей и наименьшей дисперсий $F = \frac{\sigma^2_{max}}{\sigma^2_{min}}$.

Оно сравнивается с табличным значением при степенях свободы f_1 и f_2, с которыми получены дисперсии σ^2_{max} и σ^2_{min}. Если $F < F$ табл., то дисперсии однородны и их можно усреднять, в противном случае этого делать нельзя и приходится проводить дополнительные опыты на том режиме, где $\sigma = \sigma_{min}$.

Усреднение дисперсий производится по обычным правилам:

$$S^2_y = \frac{\sum \sigma_i^2}{N},$$

где N – число уровней, на которых варьировалась переменная $x(V)$ (в нашем случае N = 3).

Вектор-столбец коэффициентов по методу наилучших линейных оценок получается по следующей формуле:

$$\|\theta\| = \|M\|^{-1} \|Y\|. \qquad (3)$$

Здесь матрица $\|M\|$ определяется, как

$$\|M\| = \sum_1^N \bar{W} f(x) f^T(x),$$

где при линейной параметризации $f^T(x) = \|1; x\|$ и $f(x) = \|x\|$,

$$\bar{W} = \frac{1}{S^2_y}$$

Матрица $\|Y\|$ определяется, как

$$\|Y\| = \sum_1^N \bar{W} \bar{y}_i f(x),$$

где $\bar{y}_i$ – среднее значение $\lg T$ при данном значении V

В этом случае воспользоваться удобно диагональной матрицей $\|M\|$, так как нахождение обратной матрицы $\|M\|^{-1}$ тогда значительно упрощается. Для этого можно применить обычно используемое при многофакторных экспериментах [4], [5] кодирование переменной X. В нашем случае, при трех уровнях варьирования, верхний уровень кодируется + I, средний - 0, нижний - I. Так как станок 6AI2П имеет геометрический ряд, то $(x_2 - x_1) = (x_3 - x_2) = \Delta x$, т.е. условия симметрии кодирования соблюдаются автоматически. Матрицы $f(x)$ и $f^T(x)$ получаются в виде:

при $x=-1$ $\quad f(x) = \left\| \begin{matrix} 1 \\ -1 \end{matrix} \right\|$, $\quad f^T(x) = \| 1; -1 \|$;

при $x=0$ $\quad f(x) = \left\| \begin{matrix} 1 \\ 0 \end{matrix} \right\|$, $\quad f^T(x) = \| 1; 0 \|$;

при $x=+1$ $\quad f(x) = \left\| \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \right\|$, $\quad f^T(x) = \| 1; 1 \|$.

Тогда $\|M\| = \left\| \begin{matrix} 3\bar{w} & 0 \\ 0 & 2\bar{w} \end{matrix} \right\|$ и $\|M\|^{-1} = \left\| \begin{matrix} \frac{1}{3\bar{w}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2\bar{w}} \end{matrix} \right\|$.

После определения матрицы (3), полученные коэффициенты подставляются в уравнение (2), которое получается в кодовом виде, и из него определяются выравненные значения $\hat{y}$ при $x=-1$; 0 и $+1$. Далее определяется дисперсия адекватности [5]:

$$S_a^2 = \frac{\sum\limits_1^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{f_a},$$

где число степеней свободы $f_a = N-(k+1)$; k - количество независимых переменных (в нашем случае k = I, так как меняется только скорость резания V).

Полученное значение S_a^2 делится на S_y^2 и определяется расчетное значение критерия Фишера для проверки адекватности модели

$$F_a^2 = \frac{S_a^2}{S_y^2},$$

которое сравнивается с табличным значением F - критерия при степенях свободы f_a и f, с которыми определялись S_a^2 и S_y^2. Если $F_a^2 < F$ табл., то модель адекватна. В противном случае исходная модель (I) и (2) не адекватна, т.е. не отражает действительного характера изменения T в зависимости от V, и для ее уточнения требуется проведение дополнительных опытов.

После этого оценивается значимость полученных коэффициентов θ_1 и θ_2 по критерию Стьюдента:

$$S^2(\theta_j) = \frac{S_y^2}{N}$$

и для каждого коэффициента рассчитывается критерий Стьюдента

$$t_i = \frac{|\theta_i|}{S(\theta_i)},$$

величина которого сравнивается с табличным значением при $f = N$. Если $t_i > t$ табл., то коэффициенты значимы.

Полученное в кодовом виде уравнение (2) преобразуется в натуральное путем подстановки

$$\tilde{y} = \theta_1 + \theta_2 \left(\frac{\tilde{x} - x_0}{\Delta x} \right),$$

где значок $\sim$ означает натуральное значение; x_0 – натуральное значение $\lg V$ на среднем уровне.

После этого получается уравнение

$$\tilde{y} = \tilde{Q}_1 + \tilde{\theta}_2 \tilde{x},$$

из которого легко получить исходное уравнение (I). Оно может быть преобразовано в уравнение

$$V = \frac{C_V}{T^{1/m}},$$

из которого при стойкости T = 20 мин рассчитывается соответствующая скорость резания V_{20}. Для стали Р18 она принимается за единицу и определяет коэффициенты относительной скорости K_V для других сталей

$$K_V = \frac{V_{20}}{V_{20\,P18}}.$$

Рассмотрим пример расчета для стали Р9М4К8. Исходные данные взяты из табл.2.

Таблица 3

Расчет средних и дисперсий воспроизводимости для стали Р9М4К8

V м/мин	$\tilde{x}$	x	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	σ_i^2
32	I,5051	- I	I,6I28	2,I746	I,9823	I,9232	0,3I 0,06 0,25	0,0960 0,0036 0,0630	0,08I
40	I,602I	0	I,602I	I,6335	-	I,6I78	0,0I6 0,0I6	0,00025	0,0005
50	I,6990	+I	I,I903	I,0792	-	I,I348	0,055 0,055	0,0030	0,006

Предварительно при v = 32 м/мин была проверена вызывающая сомнение точка y_1 = I,6I28 (T_I = 4I мин);

$$\bar{\bar{y}} = \frac{y_2 + y_3}{2} = \frac{2,1746 + 1,9823}{2} = 2,0785;$$

$$(\bar{\bar{y}} - y_3) = (y_2 - \bar{\bar{y}}) = 0,0962 \approx 0,1; \quad \sigma^2 = 0,02;$$

$$t = \frac{\bar{y} - y_1}{\sqrt{\sigma^2}} = \frac{2{,}0785 - 1{,}6128}{\sqrt{0{,}02}} = 3{,}33 ;$$

$$t_{табл} (f = 1;\ p = 0{,}05) = 12{,}71 ;$$

$t < t_{табл}$ точку отбрасывать нельзя.

Проверка однородности дисперсий (табл.3) показала, что

$$F = \frac{0{,}0810}{0{,}0005} = 162 ; \quad F_{табл}(f_1 = 2 ; f_2 = 1) = 199{,}5 ;$$

$F < F_{табл}$, значит дисперсии однородны;

$$S_y^2 = \frac{0{,}08I0 + 0{,}0060 + 0{,}0005}{3} = 0{,}03;$$

$$\bar{W} = \frac{I}{S_y^2} = \frac{I}{0{,}03} = 33{,}3;$$

$$\|M\| = \begin{Vmatrix} 33{,}3 & -33{,}3 \\ -33{,}3 & 33{,}3 \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 33{,}3 & 0 \\ 0 & 0 \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 33{,}3 & 33{,}3 \\ 33{,}3 & 33{,}3 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 66{,}6 \end{Vmatrix} ;$$

$$\|M\|^{-1} = \begin{Vmatrix} 0{,}01 & 0 \\ 0 & 0{,}015 \end{Vmatrix} ;$$

$$\|Y\| = 1{,}9232 \cdot 33{,}3 \begin{Vmatrix} 1 \\ 1 \end{Vmatrix} + 1{,}6178 \cdot 33{,}3 \begin{Vmatrix} 1 \\ 0 \end{Vmatrix} + 1{,}1348 \cdot 33{,}3 \begin{Vmatrix} 1 \\ 1 \end{Vmatrix} =$$

$$= \begin{Vmatrix} 64 \\ -64 \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 54 \\ 0 \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 38 \\ 38 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 156 \\ -26 \end{Vmatrix} ;$$

$$\|\theta\| = \|M\|^{-1} \|Y\| = \begin{Vmatrix} 0{,}01 & 0 \\ 0 & 0{,}015 \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} 156 \\ -26 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 1{,}56 \\ -0{,}39 \end{Vmatrix} .$$

В кодовом виде уравнение стойкости примет вид

$$y = I{,}56 - 0{,}39X$$

Выравненные значения y :

при $X_I = +I$ $\hat{y}_1 = I{,}56 - 0{,}39 = I{,}I7;$

при $X_2 = 0$ $\hat{y}_2 = I{,}56;$

при $X_3 = -I$ $\hat{y}_3 = I{,}56 + 0{,}39 = I{,}95.$

Расчет дисперсии адекватности

$\hat{y}_1 - \bar{y}_1 = I{,}I700 - I{,}I348 = 0{,}035$, $(\hat{y}_1 - \bar{y}_1)^2 = 0{,}00I225;$

$\hat{y}_2 - \bar{y}_2$ = I,5600 - I, 6I78 = - 0,068, $(\hat{y}_2 - \bar{y}_2)^2$ = 0,004624;

$\hat{y}_3 - \bar{y}_3$ = I,9500 - I,9232 = 0,027, $(\hat{y}_3 - \bar{y}_3)^2$ = 0,000729;

$$S_a^2 \approx 0,007.$$

Так как $S_a^2 < S_y^2$, то $F<1$, а поскольку в таблице Фишера все $F_{табл} > 1$, поэтому рассчитывать F не нужно.

Проверка значимости коэффициентов

$$S^2(\theta_j) = \frac{0,03}{3} = 0,01\ ; \quad S(\theta_j) = \sqrt{0,01} = 0,1\ ;$$

$$t_1 = \frac{1,56}{0,1} = 15,6\ ; \quad t_2 = \frac{0,39}{0,1} = 3,9\ ; \quad t_{табл(f=3)} = 3,182,$$

так как t_1 и $t_2 < t_{табл}$, следовательно оба коэффициента значимы.

Преобразуем уравнения в натуральное

$$\tilde{y} = 1,56 - 0,39\left(\frac{\tilde{x} - 1,60}{0,097}\right) = 8 - 4?\ .$$

Тогда зависимость $T - v$ примет вид

$$T = \frac{10^8}{v^4}\ .$$

После преобразования получим

$$v = \frac{100}{T^{0,25}}\ ,$$

$$v_{20} = 47,3\ м/мин \quad и\ K_v = 1,971.$$

Результаты расчетов для исследованных материалов приведены в табл.4.

Таблица 4

Результаты расчетов коэффициентов K_v для исследованных материалов

Марка стали	C	m	C_v	$\frac{1}{m}$	V_{20}	K_v
Р I8	$5 \cdot 10^4$	2,47	79	0,4	24[x]	I
Р I2	$3,89 \cdot 10^4$	2,I6	I33	0,46	33	I,375
Р 9	$2,09 \cdot 10^6$	3,3	8I	0,3	33,I	I,380
Р9К5	$4,07 \cdot 10^6$	3,5	70	0,28	34,7	I,445
Р6М5	$2,3 \cdot 10^6$	3,3	83	0,3	34	I,4I6
Р9М4К8	10^8	4	I00	0,25	47,3	I,97I

Продолжение табл. 4

Марка стали	c	m	C_v	$\frac{1}{m}$	V_{20}	K_v
Р9Ф4К8М	$2{,}79\cdot10^6$	3,30	97,7	0,30	39,8	1,660
Р6М4К12	$2{,}82\cdot10^8$	5,25	40	0,19	35,3	1,471
ЭП 379	$5{,}75\cdot10^8$	4,02	85,1	0,25	40,8	1,700
ЭП 657	$9{,}50\cdot10^5$	2,88	114,8	0,35	40,3	1,679
ЭП 658	$6{,}61\cdot10^5$	2,68	148	0,37	49	2,04
ЭП 733	$7{,}94\cdot10^6$	4,22	79	0,23	36,3[xx]	1,512
ЭП 734	$2{,}4\cdot10^5$	2,43	162,2	0,41	43,3	1,804
Р14М7К25	$1{,}175\cdot10^6$	3,2	162,2	0,31	64,6[x]	2,700

Из табл. 4 видно, что наилучшие результаты показал дисперсионно-твердеющий быстрорежущий сплав Р14М7К25, применение которого позволяет повысить производительность концевого фрезерования стали 18Х2Н4ВА на 170%. Хорошие результаты также дают стали повышенной теплостойкости ЭП 658 и Р9М4К8, которые повышают производительность соответственно на 104 и 97%. Применение стали Р18 нерационально, так как она показала самую низкую производительность.

---

[x] Величины условны, так как они выходят за исследованную область значений V ($32 < V < 50$ м/мин).

[xx] Величина условна, так как дисперсии неоднородны и усреднены условно.

Литература

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М., " Металлургия", 1968.
2. Попандопуло А.Н. и др. Сталь и инструмент для резания труднообрабатываемых сталей. Труды ЛПИ им. М.И. Калинина. Л., " Машиностроение", 1969, № 307.
3. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М., " Наука", 1971.
4. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. М., " Машиностроение", 1968.
5. Адлер Ю.П. и др. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. М., " Наука", 1971.