

Приведенные зависимости позволяют на стадии проектирования обеспечить работоспособность секционного подшипника скольжения средствами автокомпенсации износа и решить задачи по выявлению условий реализации режима гидродинамической смазки при восприятии подшипником скольжения заданной внешней радиальной нагрузки, установлению зависимости от внешней нагрузки момента сил трения, установлению допустимой величины износа поверхностей трения и прогнозирования по нему ресурса работы подшипника скольжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михин, Н. М.** Эффект автокомпенсации износа в самоуплотняющихся опорах скольжения / Н. М. Михин, М. А. Сляднев. // Докл. АН СССР. 1984. Т. 272, № 6. С. 1359–1363.
2. **Литвинов, В. Н.** Физико-химическая механика избирательного переноса при трении / В. Н. Литвинов, Н. М. Михин, Н. К. Мышкин. М.: Наука, 1979. — 188 с.
3. **Михин, Н. М.** Работоспособность и триботехническая эффективность опор скольжения при действии натяга / Н. М. Михин, М. А. Сляднев, И. А. Сорокин // Науч.-техн. информ. сб. Сер. «Строительство нефтяных и газовых скважин на

суше и на море». М.: ВНИИОЭНГ, 1992. Вып. 4. С. 10–14.

4. **Радин, Ю. А.** Безызносность деталей машин при трении / Ю. А. Радин, П. Г. Суслов. Л.: Машиностроение, 1989. 229 с.
5. **Справочник по триботехнике.** Т. 3. М.: Машиностроение, 1992. Варшава: ВКЛ, 1992. 730 с.
6. **Пат.** на полезн. модель № 29352 МПК F16C17/02. Опора скольжения / Д. В. Пичугин, М. А. Сляднев, Н. М. Михин.
7. **Прочность. Устойчивость. Колебания:** Справочник. Т. 2 / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 489 с.

#### ОБ АВТОРЕ



**Пичугин Дмитрий Владимирович**, референт начальника Департамента по добыче газа, газового конденсата, нефти ОАО «Газпром». Дипл. инж.-мех. по технол. машиностр. (Московск. ин-т нефтехим. и газ. пром-ти им. И. М. Губкина, 1982). Канд. техн. наук по трению и износу в машинах (там же, 1986). Иссл. в обл. трения и износа.

УДК 621.941.1

**В. Н. ИППОЛИТОВ, В. М. КИШУРОВ, М. Ф. МУГАФАРОВ**

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ИНСТРУМЕНТАМИ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ РАБОЧИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Рассмотрена возможность определения оптимальных скоростей резания при точении конструкционных сталей без проведения длительных по времени и дорогостоящих стойкостных испытаний. Разработана математическая модель, позволяющая назначать оптимальные скорости резания при обработке конструкционных сталей инструментами с модифицированными рабочими поверхностями, обеспечивающими повышенную их износостойкость. *Оптимальная скорость резания; модифицированные рабочие поверхности инструмента*

Известно, что применение многофакторного планирования эксперимента позволяет получить математическую модель, которая наиболее полно отражает внутренние связи исследуемого процесса [1].

Основной предпосылкой для аналитического определения оптимальной скорости резания  $V_0$  явилось существование тесной взаимосвязи, с одной стороны, между  $V_0$  и действительным пределом прочности  $S_b$  обрабатываемого материала и с другой — между  $V_0$  и параметром (модификации) упрочнения.

Суммарным критерием, оценивающим одновременно влияние прочности ( $\sigma_b$ , НВ) и пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) обрабатываемого материала, является действительный (истинный) предел прочности при растяжении  $S_b = \sigma_b(1 + \delta)$ . Эта величина является достаточно точной характеристикой удельной работы деформации при резании, учитыва-

ющей действующие на рабочей поверхности инструмента усилия и температуры [2, 3].

Для получения аналитической зависимости  $V_0 = f(S_b, s, t, r, K_{ми})$  был проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2<sup>5</sup>.

В качестве независимых переменных были взяты действительный предел прочности стали при оптимальной температуре  $S_b$ , подача  $s$ , глубина резания  $t$ , радиус резца при вершине  $r$  и параметр упрочнения (модификации)  $K_{ми}$ .

Кодовое обозначение и уровни этих переменных приведены в табл. 1.

Кодирование факторов производилось по следующей формуле:

$$x_i = \frac{2(\lg X_i - \lg X_{i\max})}{\lg X_{i\max} - \lg X_{i\min}} + 1, \quad (1)$$

где  $i$  — номер фактора;  $x_i$  — кодированное значение  $i$ -го фактора;  $X_i$  — натуральное значение  $i$ -го

Таблица 1

Кодовое обозначение и уровни переменных

Уровни варьирования		Независимые переменные, влияющие на $V_0$				
		Действ. предел проч. $S_b, Н/мм^2$	Подача $s, мм/об$	Глубина резания $t, мм$	Радиус резца при верш. $r, мм$	Модификация $K_{из}$
Верхний	+1	1015	0,15	1,0	1,5	1,4
Средний	0	798,5	0,1	0,625	1,0	1,2
Нижний	-1	582	0,05	0,25	0,5	1,0

Таблица 2

Матрица планирования  $2^5$  и результаты эксперимента при определении зависимости  $V_0 = f(S_b, s, t, r, K_{из})$ 

№ п.п.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_1x_5$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_2x_5$	$x_3x_4$	$x_3x_5$	$x_4x_5$	$V_0$ эксп.	Результаты расчета $V_0$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	38,29	38,28758919
2	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	69,43	69,39995611
3	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	82,5	82,5228153
4	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	149,6	149,580579
5	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	41,05	41,0499306
6	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	74,4	74,4069669
7	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	88,4	88,47660331
8	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	160,37	160,3723953
9	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	29,08	29,06670533
10	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	52,7	52,68621286
11	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	62,66	62,64866516
12	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	113,5	113,5567609
13	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	31,16	31,16378601
14	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	56,5	56,4873743
15	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	67,16	67,16858939
16	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-	-	121,78	121,7495605
17	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	-	-	27,35	27,35859845
18	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	49,6	49,59010404
19	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-	58,93	58,96711217
20	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	106,85	106,8835903
21	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	29,3	29,33244404
22	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	53,16	53,16788997
23	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	63,46	63,22142275
24	+	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	114,5	114,5949394
25	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	20,77	20,76976733
26	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	37,66	37,6472108
27	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	44,76	44,76593355
28	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	81,15	81,14258144
29	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	22,26	22,26824738
30	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	40,37	40,36335072
31	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	47,97	47,99566921
32	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	86,98	86,99678948
33	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
34	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
$b_i$	1,76128	-0,12913	-0,16678	-0,0151	0,0598	0,07298	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

фактора;  $X_{i\max}$ ,  $X_{i\min}$  — максимальное и минимальное значение  $i$ -го фактора.

Матрица планирования  $2^5$  и результаты экспериментов приведены в табл. 2.

При этом постулировалась математическая модель в виде полинома первого порядка

$$y = \lg V_0 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 +$$

$$+ b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{45}x_4x_5. \quad (2)$$

Реализация плана (ПФЭ) позволила получить адекватную математическую модель

$$y = \lg V_0 = 1,761281 - 0,129151x_1 - 0,166758x_2 - 0,015127x_3 + 0,059831x_4 + 0,072982x_5. \quad (3)$$

Коэффициенты регрессии рассчитывались методом наименьших квадратов в среде Microsoft Excel.

Проверка коэффициентов регрессии на значимость проводилась с помощью *t*-критерия по формуле

$$t_{расч} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S_E \cdot C_{ii}}} > t_{табл}, \quad (4)$$

где  $|b_i|$  — абсолютная величина коэффициента регрессии;  $S_E$  — дисперсия опыта;  $C_{ii}$  — диагональный элемент ковариационной матрицы.

В результате все коэффициенты парного взаимодействия оказались незначимыми.

Проверка модели на адекватность производилась по *F*-критерию.

$$F_{расч} = \frac{S_e f_E}{S_E f_e} < F_{табл}, \quad (5)$$

где  $S_e$  — дисперсия, характеризующая неадекватность представления результатов эксперимента;

$$f_E = n_0 - 1;$$

$f_e = n - k$  — степень свободы ( $k$  — количество вычисленных коэффициентов регрессии).

Интерпретация уравнения (3) показывает, что повышение  $S_b$ ,  $s$  и  $t$  приводит к снижению  $V_0$ , а повышение  $r$  и  $K_{ми}$  — к повышению  $V_0$ .

Используя зависимость (1), уравнение (3) можно преобразовать в степенную зависимость для натуральных величин

$$V_0 = 10^{4.032057} S_b^{-1.069379} s^{-0.699017} t^{-0.050251} \times r^{0.2508} K_{ми}^{0.998879}, \text{ м/мин.} \quad (6)$$

С помощью разработанных моделей, удалось впервые в формализованном виде представить влияние различных типов износостойких покрытий на величину оптимальной скорости резания при точении конструкционных сталей инструментами из быстрорежущей стали P6M5.

Предложенные модели учитывают влияние на оптимальную скорость резания таких параметров, как механические свойства обрабатываемых материалов, режимы резания, геометрия инструмента и вид модификации.

Область применения модели  $V_0 = f(S_b, s, t, r, K_{ми})$  определяется диапазоном изменения параметров процесса резания и различными типами износостойких покрытий. Этот диапазон возможного изменения параметров режимов обработки, свойств обрабатываемых материалов, геометрии инструмента и покрытий рабочих поверхностей инструмента достаточно широк применительно к чистовой обработке и соответствует реальным условиям машиностроительного производства (табл. 1). Поэтому их целесообразно использовать при расчете оптимальных режимов резания инструментами с покрытиями.

Полученные модели были использованы при составлении программ для расчета на ЭВМ оптимальных режимов обработки конструкционных

материалов инструментами с покрытием. Структурная блок-схема показана на рис. 1.

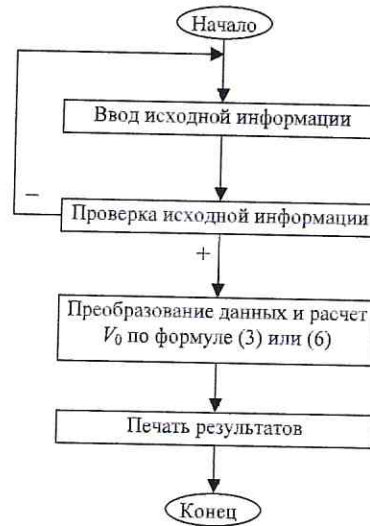


Рис. 1. Структурная блок-схема программы расчета оптимальных скоростей резания при обработке конструкционных сталей резцами, подвергнутыми упрочнению

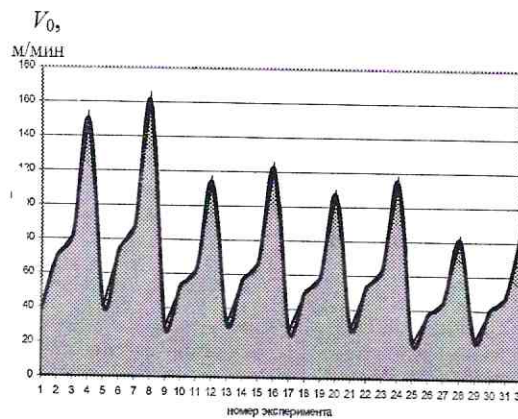


Рис. 2. Экспериментальные (серая заливка) и расчетные (черная линия) данные оптимальной скорости резания при точении конструкционных сталей резцами P6M5

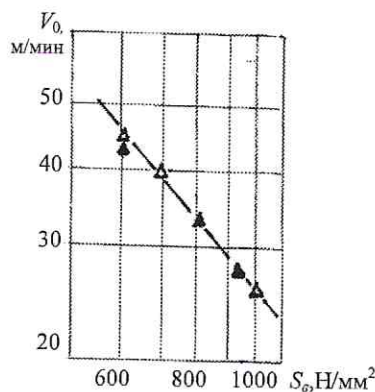


Рис. 3. Влияние  $S_b$  на  $V_0$  при точении стали 40X резцом P6M5 ( $t = 0,25$  мм;  $r = 0,5$  мм;  $s = 0,125$  мм/об):  $\Delta$  — расчетные;  $\blacktriangle$  — экспериментальные

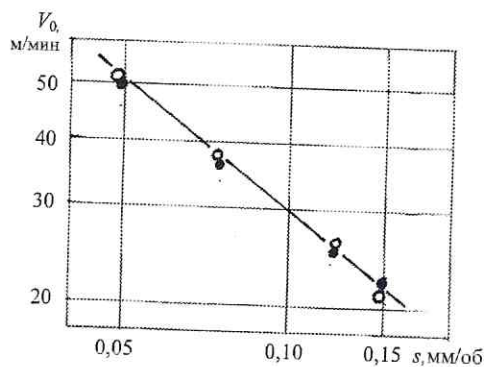


Рис. 4. Влияние подачи  $s$  на  $V_0$  при точении стали 40X резцом Р6М5 ( $t = 0,25$  мм;  $r = 0,5$  мм;  $S_b = 1015$  Н/мм<sup>2</sup>):  $\circ$  — расчетные;  $\bullet$  — экспериментальные

Эта программа позволяет при расчетах оптимальной скорости резания учесть свойства обрабатываемого материала, показателя упрочнения инструмента, параметры режимов резания и геометрию режущего инструмента.

Экспериментальная проверка показала хорошую сходимость опытных и расчетных значений  $V_0$  (рис. 2–4).

Как видно из представленных графиков, расхождения расчетных и экспериментальных значений оптимальной скорости резания незначительны, что подтверждает адекватность построенной модели и применимость формул (3) и (6) для практических расчетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров, А. Д. Применение математического планирования экспериментов при исследовании основных параметров процесса резания металлов: учеб. пособие / А. Д. Макаров, В. М. Кривошей, Ю. В. Никитин. Уфа: УАИ, 1976. 116 с.
2. Ташлицкий, Н. И. Методы приближенного определения скоростей течения жаропрочных сталей и сплавов / Н. И. Ташлицкий. Вестник машиностроения. 1956. № 10. С. 13–16.

3. Кишуров, В. М. Влияние упрочняющей  $\gamma$ -фазы и высокотемпературной прочности никелевых сплавов на основные показатели механической обработки: дис. ... канд. техн. наук / В. М. Кишуров. Уфа, 1973. 159 с.

#### ОБ АВТОРАХ



Ипполитов Владимир Николаевич, нач. инстр. производства ОАО МК «Витязь». Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1987). Готовит дис. в обл. повышения износостойкости режущего инструмента.



Кишуров Владимир Михайлович, зав. каф. теор. и технол. механообработки филиала УГАТУ в г. Ишимбае. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1966). Канд. техн. наук по технол. двигателей ЛА (МАИ, 1973). Иссл. в обл. обрабатываемости материалов лезвийным инструментом.



Мугафаров Марат Фавильевич, ст. преп. каф. физики и матем. там же. Дипл. мат.-информат. (СГПИ, 1999). Канд. физ.-мат. наук по диф. уравнениям. Иссл. краевых задач для диф. уравнений.

УДК 336

Н. И. ЮСУПОВА, Л. Ф. РОЗАНОВА, З. В. МАКСИМЕНКО

### МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Рассматриваются методы оценки эффективности реальных инвестиционных проектов в условиях неопределенности, обусловленной неопределенностью исходных данных, для поддержки принятия решений о распределении инвестиций. *Инвестиционный проект; неопределенность; эффективность инвестиций*

Экономика любой страны не может существовать без инвестиций в реальный сектор экономики, которые позволяют поддерживать уровень

национального производства на высоком уровне, оздоравливать существующие предприятия в раз-

Результаты, представленные в данной статье, получены при проведении исследований в рамках НТП Минобразования России, проект № 1256 «Модели системного анализа и реформирования межбюджетных отношений муниципальных и региональных образований» и НИР ИФ-ТК-14-04-03/6 «Исследование проблем развития, управления, контроля и моделирования в сложных системах».