



# ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**9**  
**2000**

МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОСТИ,  
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

АО «КОМПАНИЯ "РОССТАНКОИНСТРУМЕНТ"»

**Главный редактор А.И. САВКИН**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:** Алексейчук Г.П., Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Гановски В.С., Древаль А.Е. (председатель секции технологии машиностроения), Дроздов Ю.Н. (председатель секции конструирования и расчета машин), Коновалов Л.В., Кузьмицкий А.А., Кутин А.А., Логунов А.В., Пименов А.Ф., Поляков Д. И., Попов Д.Н., Рыбакова Л.М., Салтыков М.А., Семенов Е.И. (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), Сумский С.Н., Трегубов Г.П., Третьяков Э.А. (председатель секции организации и экономики производства), Цыганкова И.А. (ответственный секретарь)

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал переводится  
на английский язык,  
переиздается  
и распространяется  
во всем мире фирмой  
"Аллертон Пресс" (США)

Ордена Трудового Красного  
Знамени издательство  
"Машиностроение"

*Адрес редакции:*

129836, Москва, ГСП-110,  
проспект Мира, д. 106

Телефоны: 287-87-93, 287-23-20

Журнал зарегистрирован 4 ноября  
1998 г. за № 018246 в Комитете  
Российской Федерации по печати

Отпечатано в Подольской  
типографии Чеховского  
полиграфического комбината.  
142100, г. Подольск, ул. Кирова, 25

**Синько В. И.** — Методы обеспечения конкурентоспособности промышленной продукции . . . . . 3

**Sinko V. I.** — The industrial production competitiveness assurance methods. . . . . 3

### КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

- Навроцкий К. Л.** — Динамика двухпозиционного пневмопривода автоматической линии . . . . . 9
- Пылаев Б. В.** — Высокомомментный вариатор. . . . . 14
- Дорохов А. Ф.** — Моделирование камеры сгорания в поршне как внутренней поверхности сложной пространственной формы . . . . . 18
- Ан И-Кан** — Геометрический расчет роторной гидромашины с некруглыми солнечными колесами и плавающими сателлитами . . . . . 22

### DESIGN, CALCULATION TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

- Navrotsky K. L.** — The two-position pneumatic drive dynamics for transfer line . . . . . 9
- Pylaev B. V.** — High-torque variable-speed drive . . . . . 14
- Dorokhov A. F.** — The combustion chamber simulation in a piston as an inside complex 3D surface . . . . . 18
- An I-Kan** — Geometrical calculation of hydraulic machine equipped with non-circular sun gears and floating planets . . . . . 22

#### В помощь конструктору

- Иванов А. С., Пулькач С. Ю.** — Определение реакций в опорах навесного мотор-редуктора . . . . . 24

#### For designer's benefit

- Ivanov A. S., Pulkach S. Yu.** — Reactions definition in the hinged motor-reducer bearings . . . . . 24

### ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

- Грубый С. В.** — Многофакторная аппроксимация полиномиальными моделями экспериментальных зависимостей резания металлов . . . . . 29
- Розенберг Ю. А.** — Создание нормативов по определению сил резания с использованием теоретических зависимостей процесса резания . . . . . 35
- Ширялкин А. Ф., Епифанов В. В., Ефимов В. В.** — Расчет трудоемкости механической обработки заготовок на примере деталей невращения . . . . . 40
- Гусейнов А. Г.** — Восстановление и упрочнение деталей машин диффузионным титанированием . . . . . 43

### MANUFACTURING ENGINEERING

- Gruby S. V.** — Multifactor approximation of the experimental metal cutting dependencies using polynomial models . . . . . 29
- Rozenberg Yu. A.** — The norms creation for cutting forces determination using theoretical dependencies at cutting process . . . . . 35
- Shiryalkin A. F., Epifanov V. V., Efimov V. V.** — The labor intensity calculation at machining by the example of non-rotating parts . . . . . 40
- Guseynov A. G.** — Restoration and strengthening of machine parts by diffusion titanizing . . . . . 43

#### Обработка материалов без снятия стружки

- Воронцов А. Л.** — Напряженное состояние заготовки при выдавливании полых изделий цилиндрическим пуансоном с радиусными фасками. . . . . 46

#### Chipless materials working

- Vorontsov A. L.** — Stressed workpiece state at the hollow parts extrusion with cylindrical radius faced punch . . . . . 46

### ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВА

- Довбищук А. В., Омельченко И. Н.** — Логистикоориентированное управление запасами продукции в условиях сезонных колебаний спроса. . . . . 50
- Албул А. А., Захарченко В. И.** — Проблемы организационного роста фирмы . . . . . 53

### PRODUCTION ORGANIZATION AND ECONOMICS

- Dovbishchuk A. V., Omelchenko I. N.** — Logistic-oriented products stock management under conditions of seasonal demand fluctuations . . . . . 50
- Albul A. A., Zakharchenko V. I.** — Problems of the company organization rise. . . . . 53

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- Свещинский В. О.** — Общие подходы к разделению картерных газов двигателей внутреннего сгорания . . . . . 58
- Захаров С. И., Захаров И. С., Смирнов С. А., Тюпин А. А., Барханова Л. В.** — Вибродиагностика состояния смазки в узлах трения качения . . . . . 61
- Реклама** . . . . . 28
- Савкин А. И.** — Краткие сообщения . . . . . 45, 49, 62, 63

### TECHNICAL INFORMATION

- Sveshchinsky V. O.** — General approaches to the crankcase gases separation in the internal combustion engines . . . . . 58
- Zakharov S. I., Zakharov I. S., Smirnov S. A., Tyupin A. A., Barkhanova L. V.** — Vibrodiagnostics of lubrication condition in the antifriction units . . . . . 61

Журнал "Вестник машиностроения" № 10 за 2000 г. выйдет объемом 72 с.

Художественный редактор *Т. Н. Галицына*  
Технический редактор *И. С. Павлова*  
Корректор *Л. Е. Соношукина*

Сдано в набор 03.07.2000. Подписано в печать 10.08.2000  
Формат 60 × 88 1/8. Бумага книжно-журнальная. Печать офсетная.  
Усл.-печ. л. 7,84. Усл. кр.-отт. 9,8. Уч.-изд. л. 9,9. Заказ 971.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.  
При перепечатке ссылка на журнал "Вестник машиностроения" обязательна.

УДК 621.941.1

С. В. ГРУБЫЙ, канд. техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

## Многофакторная аппроксимация полиномиальными моделями экспериментальных зависимостей резания металлов

Рассматривается многофакторная аппроксимация полиномиальными моделями экспериментальных зависимостей резания металлов. Исследованный метод стохастической аппроксимации позволяет существенно уменьшить погрешность аппроксимации и тем самым дать более глубокую интерпретацию результатов физических экспериментов в области технологии обработки резанием.

Multifactor approximation of the experimental metal cutting dependencies using polynomial models is considered. Investigated method of stochastic approximation allows to reduce considerably the approximation error and thereby to interpret more deeply results of physical experiments in the mechanical engineering field.

В области механической обработки материалов резанием за последние десятилетия наблюдался существенный прогресс в разработке и практическом применении инструментов прогрессивных конструкций, оснащенных современными инструментальными материалами. Причем за эти годы накоплен значительный экспериментальный материал, характеризующий процесс резания и режущие свойства инструментов. Вместе с тем, используемый при обработке экспериментальных зависимостей математический аппарат традиционно основан на применении степенных и показательных уравнений [1], которые позволяют аппроксимировать многофакторные зависимости в узком диапазоне режимных параметров с использованием поправочных коэффициентов и дополнительных таблиц, например, как в работе [2].

В этой связи в МГТУ им. Н. Э. Баумана на кафедре "Инструментальная техника и технологии" рассмотрены задачи по совершенствованию научно-методических основ обработки результатов многофакторных экспериментальных исследований резания металлов в широких диапазонах переменных технологических и режимных параметров, по разработке новых методов математического обобщения функциональных экспериментальных зависимостей. Актуальность поставленных задач также возрастает в связи с качественно новыми возможностями по разработке сложных математических моделей и автоматизации процессов обработки результатов экспериментальных исследований на современных ПЭВМ. Причем сложность итоговых математических уравне-

ний не имеет принципиального значения, а сокращение времени и упрощение процедур аппроксимации достигается за счет совершенствования математического и программного аппаратов.

В качестве основы многофакторной аппроксимации рассмотрены полиномиальные модели в рамках общей функции в  $i$ -й точке факторного пространства

$$y_i = \eta(x_i) + e_i = \sum_{j=1}^k b_j f_{ij}(x_i) + e_i; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

или в матричном виде  $y = B^T f(x)$ ,

где  $N$  — общее число точек;  $k$  — число коэффициентов (членов) модели;  $x_i$  — матрица-столбец входных переменных;  $f_{ij}(x_i)$  — функции (полиномы);  $b_j$  — неизвестные коэффициенты;  $e_i$  — суммарная ошибка;  $B$  — матрица коэффициентов.

Стандартный подход в использовании полиномиальных моделей предусматривает проведение опытов по многофакторной схеме в соответствии с положениями математической теории планирования экспериментов. Возможно также сочетание однофакторной и многофакторной схем проведения опытов. Такой подход был применен при исследовании режущих свойств сборных твердосплавных резцов при обработке качественных углеродистых и низколегированных сталей. На рис. 1 приведены геометрические интерпретации планов проведения опытов по многофакторной схеме в стойкостных и силовых экспериментах. При выборе планов проведения опытов учитывали желательные свойства — симметричность, ортогональность, ротатабельность, равномерность, композиционность, а также соответствие некоторым критериям, в первую очередь  $D$ -оптимальности (обеспечивает минимум обобщенной дисперсии всех оценок коэффициентов) и  $G$ -оптимальности (минимизирует максимально возможную дисперсию предсказания функции). Предпочтение отдавали планам, предусматривающим проведение минимального числа опытов (экономичным). По результатам проведения опытов получены оценки коэффициентов полино-

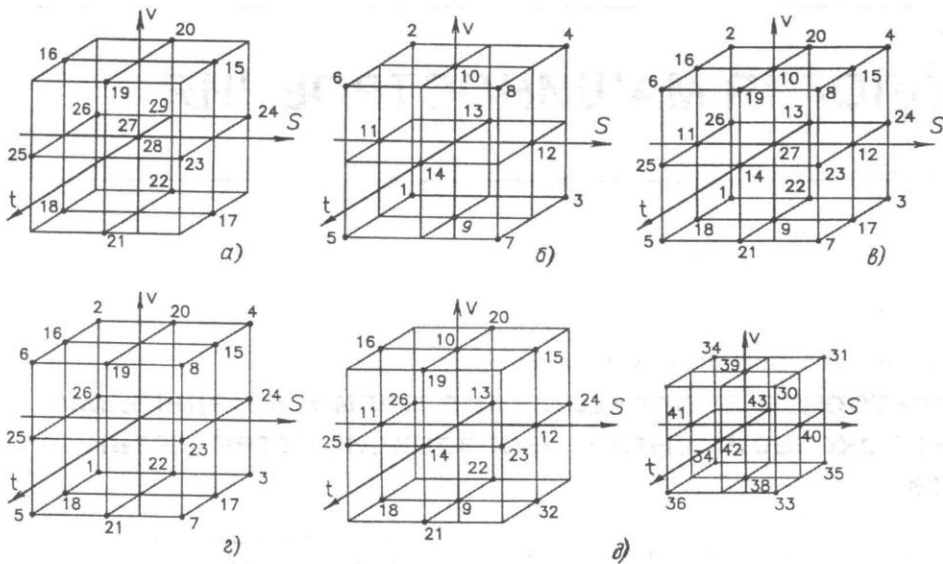


Рис. 1. Геометрические интерпретации планов проведения опытов в стойкостных экспериментах:

*a* — Бокса — Бенкена, симметричный, трехуровневый, почти ротатабельный,  $N = 15$ ; *б* — Бокса  $B_3$ , симметричный, трехуровневый, почти  $D$ -оптимальный, композиционный,  $N = 14$ ; *в* — ПФЭ  $3^3$ , симметричный, трехуровневый, ортогональный, композиционный,  $N = 27$ ; *г* —  $D$ -,  $G$ -оптимальный, симметричный,  $N = 20$ ; *д* — композиционный, симметричный, локально-ортогональный III порядка,  $N = 32$

миальных моделей по известному алгоритму метода наименьших квадратов (МНК)

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y = M^{-1} \cdot X^T \cdot Y = L \cdot Y, \quad (2)$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $M^{-1}$ ,  $L$  — матрицы соответственно условий эксперимента, результатов наблюдений, ковариационная и вспомогательная известны для стандартных планов [3].

В качестве независимых переменных были выбраны режимные параметры: скорость  $v$  резания, подача  $S$ , глубина  $t$ , а зависимыми переменными (функциями) являлись стойкость инструмента и силы резания. Предполагаемыми полиномиальными моделями в рамках общей функции (1) были приняты модели вида: неполная квадратичная (без квадратов взаимодействий факторов); полная второго порядка; неполная третьего порядка; полная кубическая. Исследованные факторы включены в модели в кодированном виде. Кодирование выполнено с учетом возможностей выбора значений подач и скоростей резания на экспериментальных станках в диапазонах: скорость резания  $0,44 \pm 3,3$  м/с, подача  $0,12 \pm 0,53$  мм/об, глубина  $0,7 \pm 4,4$  мм [4, 5].

Анализ погрешностей аппроксимации показывает, что погрешности возникают из-за несоответствия структуры выбранной модели действительной, а также вследствие ошибки воспроизводимости (повторяемости) отдельно опыта:

$$\begin{aligned} S^2 &= W^2 + Q^2 = W^2 + N^{-1} s_e^2 \sum_{i=1}^N f^T(x_i) M^{-1} f(x_i) = \\ &= W^2 + N^{-1} s_e^2 \sum_{i=1}^N d_i = W^2 + s_e^2 d_{sr}, \end{aligned}$$

где  $x_i$ ,  $f(x_i)$  — матрицы соответственно входных переменных и функций полиномов;  $N$  — число опытов;  $s_e^2$  — дисперсия опыта;  $d_i$  — коэффициент дисперсии (мера точности плана) в точке проведения опыта.

Таким образом, общая погрешность зависит от выбранной модели (систематическая составляющая  $W^2$ ), свойств плана проведения опытов (коэффициент  $d_{sr}$ ) и погрешности опыта (дисперсия  $s_e^2$ ). Дисперсия опыта зависит от точности измерений и стабильности условий экспериментов и может быть определена по результатам повторных экспериментов (дублирования опытов). Поэтому для составляющих  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  силы резания определены средние по области планирования дисперсии опыта, равные соответственно 642,9; 721,1 и 900,4  $H^2$ , а для стойкости средняя дисперсия составила  $s_e^2 = 95,6$  мин<sup>2</sup>.

Полиномиальные уравнения составляющих силы резания установлены по полной модели второго порядка, причем средние дисперсии аппроксимации для составляющих  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  силы резания оказались равными соответственно 458,0; 667,3 и 825,9  $H^2$ , т. е. меньшими, чем дисперсии опыта. Последнее согласуется с выражением общей погрешности при условии, что систематическая составляющая  $W^2$  погрешности есть малая величина, а коэффициент  $d_{sr} < 1$ .

Погрешности аппроксимации стойкости полиномиальными уравнениями с коэффициентами, рассчитанными по МНК, имеют значительную величину. Так, дисперсия аппроксимации по неполной кубической модели составляет 210,3 мин<sup>2</sup> и превосходит среднюю дисперсию опыта, причем усложнение модели до пол-

ной кубической не только не уменьшает, но даже увеличивает погрешность.

Проведенный анализ указывает на ограниченность принятых схем многофакторного планирования экспериментов и МНК-оценок коэффициентов выбором вида модели и свойствами плана. Так, уменьшение систематического отклонения за счет усложнения модели может привести к увеличению случайного отклонения из-за увеличения коэффициента дисперсии. Причем оперативный анализ коэффициентов дисперсии возможен для стандартных планов с известными ковариационными матрицами  $M^{-1}$ . Произвольное расположение опытных точек в факторном пространстве приводит к сложности расчета обратной матрицы  $M^{-1}$  и вызывает неопределенность в оценке случайной погрешности.

Отмеченные недостатки могут быть в значительной степени уменьшены при расчете коэффициентов по методу стохастической аппроксимации (МСА), который не накладывает ограничений на число и расположение точек в факторном пространстве, порядок и вид взаимодействия факторов, число членов модели. Алгоритм МСА имеет вид

$$B_r = B_{r-1} + g_r f(x_i) [y_{ei} - B_{r-1}^T f(x_i)], \quad (3)$$

где  $y_{ei}$  — экспериментальное значение функции в  $i$ -й точке;  $g_1, \dots, g_r$  — последовательность положительных чисел;  $r$  — номер итерации.

Метод нашел общую теоретическую проработку, например в работе [6], и впервые использован для аппроксимации многофакторных зависимостей резания металлов в работах [5, 7].

Метод стохастической аппроксимации позволяет найти новую последовательность неизвестных коэффициентов, составляющих матрицу  $B$  полиномиальной модели  $Y = B^T \cdot f(x)$ , путем уточнения на каждой итерации без составления и решения систем уравнений, присущих методу наименьших квадратов. Число коэффициентов матрицы  $B$  соответствует числу членов модели, задаваемых матрицей  $f$  функций полиномов для набора значений факторов  $x_i$  в каждой опытной точке.

Расчетная программа в соответствии с алгоритмом МСА предусматривает ввод значений положительных чисел  $g_r$ , а также взаимодействует с текстовым файлом исходных данных, содержащим  $N$  строк последовательных чисел — значений факторов и соответствующего им экспериментального значения функции в каждой строке. Матрица  $B$  коэффициентов уточняется с использованием данных каждой строки исходного файла в соответствии с процедурой (3). После использования всех  $N$  строк файла рассчитывается средняя погрешность аппроксимации, которая сравнивается с предыдущим значением этой погрешности, а их разность согласуется с заданным числом  $dd$ . Числа  $g_r$  и  $dd$  могут изменяться после уменьшения погрешности до определенного предела, причем значения  $g_r$  приблизительно равны величине  $1/N_r$ , где  $N_r$  — общее число итераций.

Особыми преимуществами алгоритм МСА обладает при оценке коэффициентов моделей с большим числом

факторов и при больших объемах опытных данных  $N$ . В этих случаях в связи со значительными объемами вычислений реализация алгоритма возможна только на ПЭВМ. Как показал вычислительный эксперимент, общая погрешность аппроксимации снижается с увеличением числа членов модели и числа итераций до определенного предела. По существу, в этом случае полиномиальные модели можно классифицировать как адаптивные и видоизменять их на любом этапе планирования, проведения и обработки результатов опытов путем добавления (исключения) членов (факторов) с последующим пересчетом коэффициентов.

С целью проверки выдвинутых положений рассмотрены многофакторные полиномиальные модели, где в качестве функций приняты: период резания, величина износа, скорость резания, период резания и величина износа начального участка на кривых износа, скорость изнашивания, силы резания, энергозатраты, шероховатость обработанной поверхности, длина контакта стружки с передней поверхностью и др. Независимые переменные (факторы) включены в модели в кодированном виде, а зависимые переменные — либо в натуральном виде, либо как логарифмы натурального значения.

На стадии разработки программного аппарата решены задачи по формированию в машинном виде базы данных по экспериментальным значениям: сил резания (11 марок сталей с разными видами термической обработки, 5 марок твердых сплавов, 7 типов сборных резцов — всего 497 опытов); износа сменных многогранных пластин (обработка стали твердым сплавом, 4 типа резцов — всего 125 кривых износа, 500 значений измеренных величин износа); шероховатости обработанной поверхности (186 опытов по измерению шероховатости по параметру  $Rz$ ).

Структура программного обеспечения, реализующего алгоритм МСА, предусматривает, что основная программа взаимодействует с текстовым исходным файлом, несущим информацию по экспериментальным значениям зависимой переменной, и генерирует текстовый (для визуального просмотра) и типизированный выходные файлы коэффициентов. Структура полиномиальной модели определена соответствующими процедурами в основной программе.

Итоговые модели являются конструкциями, включающими в ряде случаев до 100 и более членов и до 17 факторов. Основные характеристики моделей приведены в таблице, где область определения задает диапазон изменения функций,  $Q_{sr}$  — средняя арифметическая погрешность аппроксимации.

В качестве примера раскрыто содержание моделей Р603, Р604, Р605 силы резания. В этих моделях функция кодирования факторов имеет общий вид

$$x_i = \text{Cod}(x_{in}, x_{max}, x_{min}) = 2(x_{in} - x_{max}) / (x_{max} - x_{min}) + 1,$$

где  $x_i$  — кодированное значение факторов;  $x_{in}$ ,  $x_{max}$ ,  $x_{min}$  — текущее, максимальное и минимальное значение фактора в натуральных единицах. В ряде случаев кодирование выполнено через логарифмы натуральных значений.

Характеристики многофакторных полиномиальных моделей

Функция	Вид функции	Условный номер модели	Число членов	Число факторов	Число точек	Область определения	Погрешность $Q_{sr}$
Период резания, мин	$lg(T)$	P301	119	12	504	1,3÷640	9,7
		P304			456	1,3÷220	5,8
		P305			48	27÷640	24,6
Скорость резания, м/с	$lg(v)$	P400	119	12	504	0,18÷3,7	0,3
		P401			456	1,0÷3,7	0,31
Период резания начального участка, мин	$lg(T_1)$	P504	119	12	125	1÷38	1,05
		P507			113	1÷15	0,8
Износ начального участка, мм	$lg(h_{z1})$	P505	75	11	125	0,05÷0,28	0,03
		P508			113	0,08÷0,28	0,03
Износ, мм	$lg(h_z)$	P306	119	12	504	0,25÷0,5	0,05
Сила резания, Н	$P_z$ $P_y$ $P_x$	P603	104	17	497	294÷4800	55,7
		P604				182÷1404	42,7
		P605				158÷2753	53,8
Энергозатраты, кДж/кг	$H_{ez}$	P607	104	17	497	206÷428	12,4
Шероховатость, мкм	$lg(Rz)$	P701	15	4	186	2,5÷92	4,5
Скорость изнашивания, мм/мин	$lg(Int)$	P510	119	12	2167	$7 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Длина контакта стружки, мм	$C$	Pc	8	2	37	0,46÷2,4	0,24

Тогда функции кодирования факторов в моделях сил резания примут вид:

$$\begin{aligned}
 v &= \text{Cod}(v_n; 5; 0,5); \\
 S &= \text{Cod}(S_n; 0,6; 0,1); \\
 t &= \text{Cod}(t_n; 6; 0,5); \\
 h_z &= \text{Cod}(h_{zn}; 1; 0); \\
 f_{i0} &= \text{Cod}(\varphi_n; 1,571; 0,785); \\
 \text{lam}_0 &= \text{Cod}(\lambda_{0n}; 0,175; -0,175); \\
 g_0 &= \text{Cod}(\gamma_{0n}; 0,262; -0,175); \\
 e &= \text{Cod}(e_n; 2,094; 0,960); \\
 g_k &= \text{Cod}(\gamma_{kn}; 0,5; 0); \\
 a_0 &= \text{Cod}(\alpha_{0n}; 0,262; 0,01); \\
 f &= \text{Cod}(f_n; 0,5; 0,1); \\
 r &= \text{Cod}(r_n; 2; 0,6); \\
 E_2 &= \text{Cod}(E_{2n}; 700; 400); \\
 \text{sigma}_b &= \text{Cod}(\sigma_{bn}; 1000; 475); \\
 \text{tau}_p &= \text{Cod}(\tau_{pn}; 1000; 475); \\
 \text{sigma}_i &= \text{Cod}(\sigma_{in}; 1450; 950); \\
 \text{HRA} &= \text{Cod}(\text{HRA}_n; 92; 88),
 \end{aligned}$$

где  $v_n$  — скорость резания, м/с;  $S_n$  — подача, мм/об;  $t_n$  — глубина, мм;  $h_{zn}$  — величина износа, мм;  $\varphi_{0n}$  — главный угол в плане, рад;  $\lambda_{0n}$  — угол наклона кромки, рад;  $\gamma_{0n}$  — передний угол, рад;  $e_n$  — угол при вершине пластины в плане, рад;  $\gamma_{kn}$  — передний угол на стру-

жечной канавке, рад;  $\alpha_{0n}$  — задний угол, рад;  $f_n$  — ширина фаски на передней поверхности, мм;  $r_n$  — радиус закругления пластины, мм;  $E_{2n}$  — модуль упругости обрабатываемого материала, ГПа;  $\sigma_{bn}$  — предел прочности, МПа;  $\tau_{pn}$  — условное напряжение в плоскости сдвига, МПа;  $\sigma_{in}$  — прочность на изгиб твердого сплава, МПа;  $\text{HRA}_n$  — твердость твердого сплава.

Общая модель сил резания включает 104 члена и составлена в рамках общей функции (1):

$$\begin{aligned}
 P &= \sum_{j=1}^{104} b_j f_{ij}(x_i) = b_1 + b_2 v + b_3 s + b_4 t + b_5 h_z + \dots + \\
 &+ b_{16} v^2 + b_{17} s^2 + b_{18} t^2 + b_{19} h_z^2 + \dots + b_{30} v^3 + b_{31} s^3 + \\
 &+ b_{32} t^3 + b_{33} h_z^3 + \dots + b_{44} v^4 + b_{45} s^4 + b_{46} t^4 + b_{47} h_z^4 + \\
 &+ \dots + b_{58} vst + b_{59} st + b_{60} s^2 t + b_{61} st^2 + \dots + b_{72} \text{lam}_0 g_0 + \\
 &+ b_{73} f_{i0} \text{lam}_0 g_0 + b_{74} er + b_{75} \text{sigma}_b \cdot \text{tau}_p + \dots + \\
 &+ b_{90} \text{sigma}_i \text{HRA} + \dots + b_{104} \text{HRA}^4.
 \end{aligned}$$

Анализ погрешностей итоговых моделей показал высокую точность аппроксимации, причем общая средняя погрешность практически соответствует погрешности опыта.

Рассматривая исходные и расчетные значения функций как случайные величины, провели регрессионный и корреляционный анализы, определили тесноту связи, которая для всех моделей близка к линейной. На рис. 2 показаны расчетные точки и линии регрессии, характеризующие связь рассчитанных по моделям P603, P604, P605 и экспериментальных значений сил резания; на

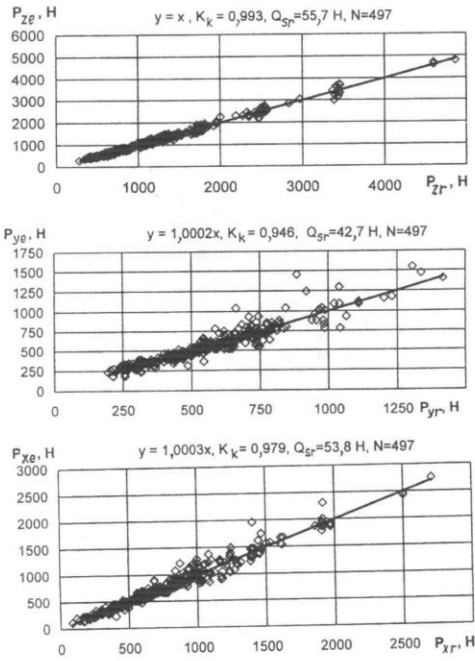


Рис. 2. Связь экспериментальных и расчетных значений сил резания: расчеты по моделям P603, P604, P605

каждом графике приведены: уравнение регрессии  $y=x$ , коэффициент  $K_k$  корреляции, средняя арифметическая погрешность  $Q_{sr}$  и число  $N$  точек.

Аналогичные графики для периода резания для моделей P301, P304, P305 (см. таблицу) даны на рис. 3. Эти модели получены по эмпирическим кривым износа. Период резания является функцией скорости, подачи, глубины, величины износа, геометрических параметров инструмента, причем модель P305 справедлива в диапазоне скоростей резания  $0,18 < v < 1 \text{ м/с}$ , модель P304 —  $1 < v < 3,7 \text{ м/с}$ , а модель P301 — в общем диапазоне  $0,18 < v < 3,7 \text{ м/с}$ .

Особый интерес представляет возможность аппроксимации скорости изнашивания режущего инструмента полиномиальными моделями с использованием алгоритма МСА. При решении этой задачи использованы 125 кривых "величина износа — период резания", полученных при разных сочетаниях исследованных факторов. Каждая кривая износа представлена в базе данных пятью парами значений:  $h_{z_1} - TT_1, \dots, h_{z_5} - TT_5$ , где первая пара значений характеризует переход участка начального изнашивания в участок нормального изнашивания.

Применена полиномиальная модель, имеющая общий вид

$$y = \eta(x) + \varepsilon = \lg(Int) = f(v, s, t, h_z, \tilde{f}_0, \lambda_{m0}, g_0, e, g_k, f, r, a_0) = B^T \cdot f(x), \quad (4)$$

где  $Int$ , мм/мин — скорость изнашивания (зависимая переменная); независимые переменные: скорость реза-

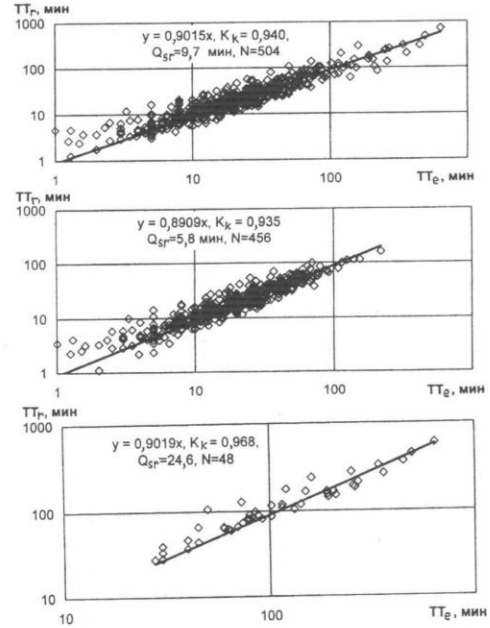


Рис. 3. Связь экспериментальных и расчетных значений периода резания: расчеты по моделям P301, P304, P305

ния, подача, глубина, величина износа, главный угол в плане, угол наклона кромки, передний угол, угол при вершине в плане, передний угол на стружечной канавке, фаска на передней поверхности, радиус при вершине, задний угол — даны в кодированном виде.

Было принято, что модель скорости изнашивания есть функция величины износа на участке нормального

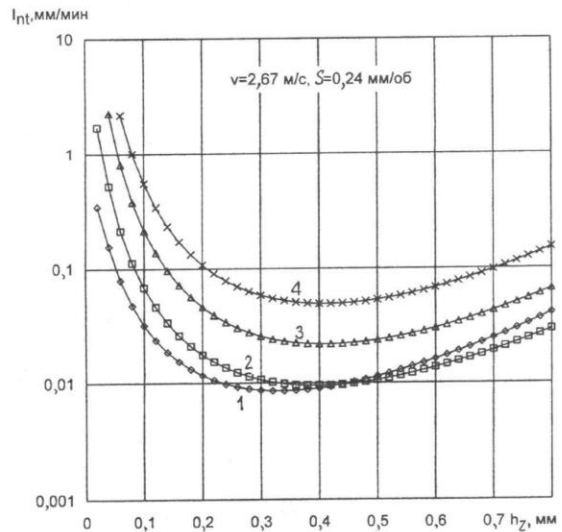


Рис. 4. Расчетные кривые скорости изнашивания при глубине резания  $t = 0,5$  (1),  $1,5$  (2),  $3$  (3) и  $4$  мм (4)

изнашивания, а участок начального изнашивания аппроксимирован степенной зависимостью  $h_z = CTT^b + 0,02$ , где постоянная и показатель степени находятся для каждой кривой износа из соответствующих граничных условий:

$$h_{z1} = CTT_1^b + 0,02; \quad Int_1 = CbTT_1^{b-1};$$

$$Int_1 = (h_{z2} - h_{z1}) / (TT_2 - TT_1).$$

Получена модель P510 (см. таблицу), где скорость изнашивания есть функция режимных параметров: скорости резания — 0,5÷5 м/с, подачи — 0,1÷0,6 мм/об, глубины — 0,5÷6 мм, величины износа — 0,02÷0,8 мм и геометрических параметров инструмента.

Анализ соответствующего полиномиального уравнения показал, что на скорость изнашивания режущего инструмента значительное влияние оказывают все исследованные факторы (рис. 4, 5). Скорость изнашивания имеет минимум при значениях износа 0,3÷0,45 мм, причем на кривых отсутствуют участки с постоянной скоростью изнашивания. Таким образом, по мере увеличения износа процесс изнашивания режущего инструмента характеризуется постоянно изменяющейся

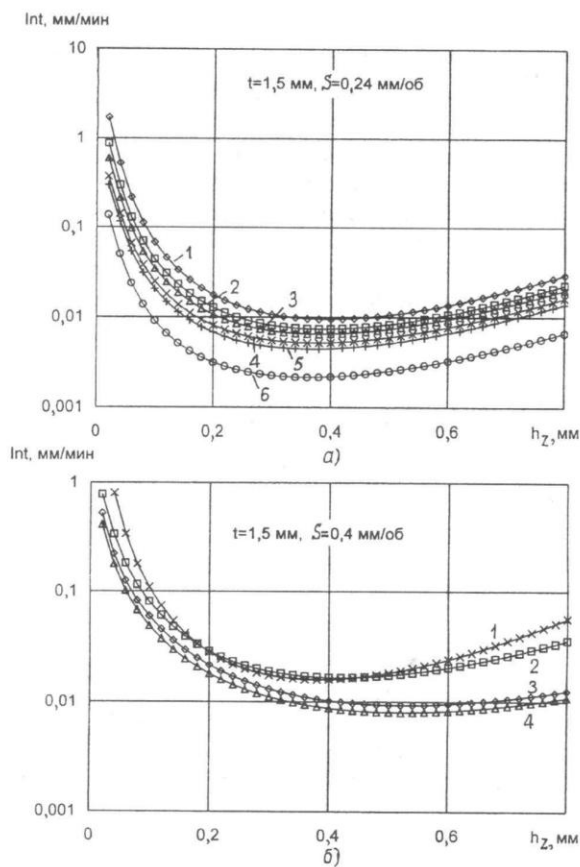


Рис. 5. Расчетные кривые скорости изнашивания: а) при скорости резания  $v = 2,67$  (1), 2,06 (2), 1,66 (3), 1,2 (4), 1,03 (5) и 0,68 м/с (6); б) резцами с пластинами трехгранной формы,  $\varphi = 90^\circ$  (1); трехгранной формы,  $\varphi = 60^\circ$  (2); квадратной формы,  $\varphi = 45^\circ$  (3); пятигранной формы,  $\varphi = 45^\circ$  (4)

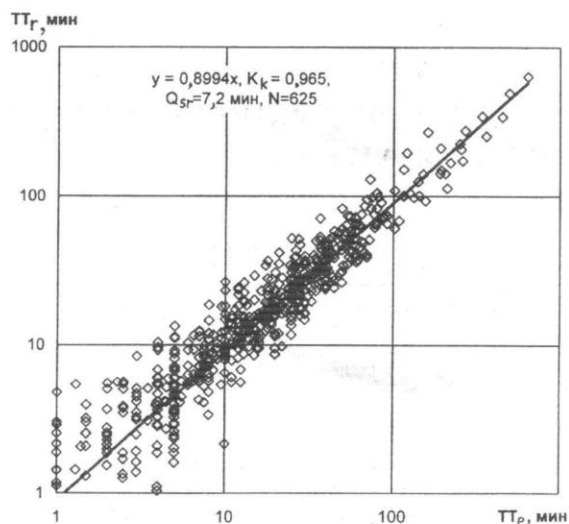


Рис. 6. Связь экспериментальных и расчетных значений периода резания: расчет численным интегрированием с использованием модели P510 скорости изнашивания

скоростью, что связано с действием таких факторов, как температура, контактные нагрузки и др.

Итоговые полиномиальные многофакторные модели суть трансцендентные математические уравнения, к которым применимы численные методы решения и анализа. Так, путем численного интегрирования скорости изнашивания с пределом по наибольшей величине износа можно рассчитать соответствующий период резания или стойкость инструмента. На рис. 6 показаны расчетные точки и линия регрессии, определяющая связь расчетных значений периода резания по модели скорости изнашивания и экспериментальных, полученных по кривым износа. График на рис. 6 по диапазону факторов полностью аналогичен графику на рис. 3 для полиномиальной модели P301 и дает лучшие оценки по средней арифметической погрешности. Характерный разброс значений для периода резания, меньшего 10 мин, соответствует начальному участку кривых износа или форсированным режимам резания.

По результатам проведенных исследований можно сделать основные выводы:

1. Разработанная эффективная методика обработки результатов многофакторных экспериментальных зависимостей резания металлов, включая зависимости скорости изнашивания, с использованием метода стохастической аппроксимации.

2. Преимущества метода стохастической аппроксимации по снижению погрешностей в сравнении с методом наименьших квадратов проявляются в большей степени с ростом числа факторов и объема опытных данных. Средние погрешности аппроксимации по МСА приближаются к соответствующим погрешностям опыта.

3. Разработанные полиномиальные модели могут служить основой математического аппарата по оптимизации режимов резания. Разработанная методика аппроксимации рекомендована для интерпретации ре-

## Создание нормативов по определению сил резания с использованием теоретических зависимостей процесса резания

Рассматриваются вопросы создания нормативов по определению сил резания не на основе эмпирических формул степенного типа, а на использовании разработанных теоретических зависимостей. Предлагается алгоритм таких нормативов.

Question of norms creation for cutting forces determination using developed theoretic dependencies are considered. Algorithm of such norms is proposed.

В процессе резания при взаимодействии режущего инструмента с обрабатываемым материалом возникают силы, называемые силами резания. Эти силы являются одними из характеристик обрабатываемости материалов резанием. Значения и закономерности изменения сил резания определяют необходимую мощность оборудования, используются при прочностных расчетах отдельных элементов оборудования, приспособлений, режущего инструмента, позволяют решать вопросы точности обработки, выбора оптимальных режимов резания, создания управляющих программ для оборудования с ЧПУ, определения оптимальных условий применения некоторых типов адаптивных систем управления и др.

Все это указывает на необходимость наличия соответствующих нормативов, позволяющих с достаточной точностью определить любую технологическую составляющую силы резания при различных видах обработки резанием. К сожалению, существующие нормативы и рекомендации по определению сил резания как у нас, так и за рубежом не отвечают этим требованиям. Это связано прежде всего с тем, что за основу при создании этих нормативов берутся эмпирические формулы степенного типа.

Как показано в многочисленных исследованиях [1, 2 и др.], эмпирические формулы позволяют определять с достаточной степенью точности силы резания только для тех условий, при которых был выполнен эксперимент. При изменении условий резания в тех же форму-

лах степенного типа постоянные коэффициенты и показатели степеней могут изменяться в широких пределах. А так как выполнить эксперимент для всех возможных сочетаний глубины  $t$  резания, подачи  $s$ , скорости  $v$  резания, свойств обрабатываемых материалов, состояния износа режущего инструмента, геометрии инструмента и др. практически невозможно, то использование формул, полученных для одних условий, для других условий резания может привести к ошибкам расчета, достигающим 200 % и более.

Используя банк экспериментальных данных по изменению сил резания, накопленных в Томском политехническом институте, ЦНИИТМАШе, Курганском машиностроительном институте и др., был выполнен анализ методов определения сил резания, предлагаемых нормативами, разработанными в нашей стране (последний выпуск [3]) и фирмой Sandvik Coramant [4]. Анализ был проведен для 12 групп материалов при точении (подача  $s = 0,1; 0,4$  и  $1$  мм/об, длина площадки износа по задней поверхности инструмента  $h_3 = 0; 0,5$  и  $1$  мм), фрезеровании ( $s_z = 0,05$  и  $0,1$  мм/зуб;  $h_3 = 0; 0,2$  и  $0,5$  мм) и сверлении ( $D = 20$  мм;  $s = 0,3$  и  $0,5$  мм/об;  $h_3 = 0; 0,5$  и  $1$  мм). Учитывая, что в работе [4] для токарной обработки рекомендации даны с учетом использования резцов с непереключаемыми многогранными пластинами, имеющими сложную форму передней поверхности, для определения действительного переднего угла использовали данные работы [5].

Анализ показал, что при расчете мощности по работе [3] ошибка расчета колеблется в пределах от  $-100$  до  $+50$  %, средняя ошибка расчета составляет 30 %. При расчетах по работе [4] также имеем ошибку расчета от  $-50$  до  $+180$  %, средняя ошибка расчета составляет 36 %. Следует отметить, что результаты расчетов по работам [3, 4] не совпадают друг с другом.

Одним недостатком является то, что в работах [3, 4 и др.] даются рекомендации в основном только по оп-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 29)

зультатов физического эксперимента в различных областях науки и техники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грановский Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. М.: Машиностроение. 1982. 112 с.
2. Грубый С. В., Зверев Е. К. Режущие свойства резцов, оснащенных безвольфрамовыми твердыми сплавами // Вестник машиностроения. 1983. № 12. С. 41—45.
3. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / Под ред. В. В. Налимова. М.: Металлургия. 1982. 751 с.

4. Грубый С. В. Сила резания и энергозатраты при точении стали резцами из безвольфрамовых твердых сплавов // Изв. вузов. Машиностроение. 1983. № 6. С. 109—113.

5. Грубый С. В., Зверев Е. К., Подураев В. Н. Определение стойкости резцов с использованием полиномиальных моделей // Изв. вузов. Машиностроение. 1983. № 10. С. 118—125.

6. Лецкий Э. К. Последовательные алгоритмы вычисления коэффициентов регрессионной модели // Проблемы планирования эксперимента / Под ред. Г. К. Круга. М.: Наука. 1969. С. 28—36.

7. Грубый С. В. Последовательное снижение погрешностей полиномиальных моделей стойкости резцов // Изв. вузов. Машиностроение. 1986. № 2. С. 146—150.