

Дополнительные преимущества предлагаемого метода: ускорение процесса минимум в 2 раза; возможно борирование выборочных поверхностей (в местах максимального износа); возможно восстановление боридного слоя после его истирания в процессе работы; экологическая чистота процесса, отсутствие профвредностей, имеющих место при ХТО; можно борировать изделия любого веса (габаритов) и конфигурации.

Наилучшим приложением метода является его использование в целях повышения эксплуатационной стойкости формообразующего инструмента для горячей обработки давлением.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка стали. — М. Машиностроение, 1965.
2. Ляхович Л. С., Ворошни Л. Г. Борирование стали. — М. Металлургиздат, 1967.
3. Соколов Г. В., Эпик А. П. Тугоплавкие покрытия. — М. Металлургия, 1973.
4. А. С. №779438. Расплав для борирования стальных деталей / Г. И. Беляева, Е. М. Файншмидт и др. // Б.И. — № 42. — 1980.

621.91

## СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

*Д-р техн. наук, проф. А.Е. ДРЕВАЛЬ, канд. техн. наук Л.Д. МАЛЬКОВА*

*Представлены и проанализированы результаты экспериментальных исследований, показавших наличие совместного влияния обработки металлов резанием на результирующее значение главной составляющей силы резания. Исследования проведены на примере наружного продольного точения. Дана методика экспериментальных исследований и математической обработки результатов, позволяющая получить полиномиальную зависимость главной составляющей силы резания от факторов механической обработки.*

*Results of the experimental researches which have displayed the presence of mutual influence in metal processes by cutting and the result value of the principal cutting force are presented and analyzed. Experiments are made on an example of external longitudinal turning. The technique of experimental researches and mathematical treatment of the results allowing to receive polynomial dependence of the principal making force of cutting on machining job factors is given.*

Анализ существующих моделей определения силы резания и моментов резания показал, что чаще всего используются эмпирические зависимости, полученные на основе экспериментальных исследований, в которых исходными данными для расчета составляющих силы резания являются параметры режима резания, геометрические параметры инструмента, твердость материалов инструмента и заготовки и т.д. В основном расчетные формулы представляют собой совокупность частных степенных зависимостей и в общем виде, например для точения, выглядят следующим образом:

$$P_z = C_p t^x S_o^y HB^n k_p \quad \text{или} \quad P_z = C_p t^x S_o^y v_n^k k_p \quad (1)$$

где  $P_z$  — главная составляющая силы резания;  $t$  — глубина резания;  $S_o$  — подача;  $v$  — скорость резания;  $HB$  — твердость обрабатываемого материала;  $k_p$  — произведение поправоч-

ных коэффициентов;  $C_p, x, y, n$  — табличные значения общего коэффициента и показателей степеней частных уравнений.

Расчет численных значений составляющих силы резания и крутящего момента при обработке стали 45 твердостью НВ 229 инструментом из быстрорежущей стали по нескольким источникам выявил значительное расхождение результатов, что проиллюстрировано данными, приведенными в табл. 1. В таблице и далее по тексту  $\varphi$  — главный угол в плане, град;  $\gamma$  — передний угол, град;  $r$  — радиус при вершине инструмента, мм;  $h_3$  — износ по задней поверхности, мм;  $t$  — глубина резания, мм;  $S_o$  — подача, мм/об;  $v$  — скорость резания, м/мин;  $D$  — диаметр отверстия, мм. При расчетах приняты параметры обработки, соответствующие наиболее распространенным условиям черновой и получистовой обработки на машиностроительных предприятиях.

Таблица 1

Результаты расчетов составляющих силы резания и крутящего момента операций механической обработки по различным источникам

Исходные данные	Расчетная величина	Источник				Относительная погрешность, %
		[1]	[2]	[3]	[4]	
Точение: $\varphi = 45^\circ$ , $\gamma = 20^\circ$ , $r = 2$ мм, $h_3 = 0,5$ мм, $t = 2$ мм, $S_o = 0,3$ мм/об, $v = 0,5$ м/с	$P_z$ , кН	1,39	1,48	1,55	1,32	17
	$P_y$ , кН	0,63	0,52	0,55	0,35	80
	$P_x$ , кН	0,56	0,96	0,42	0,31	80
Точение: $\varphi = 90^\circ$ , $\gamma = 12^\circ$ , $r = 4$ мм, $h_3 = 2$ мм, $t = 2$ мм, $S_o = 0,7$ мм/об, $v = 0,8$ м/с	$P_z$ , кН	3,58	2,79	4,01	3,39	44
	$P_y$ , кН	1,11	0,98	1,50	1,02	53
	$P_x$ , кН	3,01	1,81	3,51	2,60	94
Сверление: $D = 20$ мм, $S_o = 0,2$ мм/об	$P_o$ , кН	3,77	6,40	5,05	4,79	70
	$M_{кр}$ , Н·м	32,60	40,76	34,94	24,12	69
Нарезание резьбы метчиком: резьба М12	$M_{кр}$ , Н·м	20,27	23,80	19,86	18,62	28

В [5] отмечено, что одной из основных причин представленных расхождений является узкий диапазон варьируемых параметров и малое число установленных уровней фактора — аргумента при получении экспериментально частных степенных зависимостей. Кроме того, указано на необходимость аппроксимации экспериментальных данных на основе более универсальных уравнений, в частности, показательных-степенных функций или полиномов, позволяющих учесть совместное влияние факторов на результат. Под совместным влиянием понимается изменение влияния одного параметра на результат при изменении уровня другого.

Таким образом, существующие расчетные модели типа (1) обладают рядом недостатков: во-первых, ряд влияющих на силу резания факторов введены в формулы в виде поправочных коэффициентов, которые грубо дифференцируют уровни фактора или не учтены вовсе; во-вторых, заведомо исключают наличие совместного влияния различных факторов обработки на динамические характеристики процесса резания.

В работах академика Н.Н. Зорева [6, 7] указано, что положение о независимости влияния факторов обработки на результат приводит к большим ошибкам. Рассмотренные им примеры влияния некоторых пар факторов, в основном, на горизонтальную проекцию силы резания на основании однофакторных экспериментов указывают на возможную погрешность результата до 250 %.

С целью комплексной оценки совместного влияния факторов обработки на главную составляющую силы резания  $P_z$  выполнено исследование на примере наружного продольного точения стали 45 ГОСТ 1050-88 твердость НВ 200. Все эксперименты, результаты которых представлены ниже, выполнены в лабораторных условиях на токарном станке 1К62 резцами с напайной пластиной Т15К6. Регистрация данных проводилась с помощью разработанной и тарированной ранее установки, предназначенной для фиксирования динамических характеристик процесса. Установка состоит из универсального динамометра УДМ 600, усилителя тензометрического 8-канального 8АНЧ-21, фильтра, коммутатора, персонального IBM-совместимого компьютера с платой аналого-цифрового преобразователя (АЦП) LA70M4.

Для достижения указанной цели выявлены параметры, варьирование которыми приводит к изменению главной составляющей силы резания при точении более чем на 10 %. В результате рассматривались: глубина резания  $t$ , подача  $S_0$ , скорость резания  $v$ , твердость обрабатываемого материала НВ, передний угол  $\gamma$ , величины фаски износа по задней поверхности  $h_z$ .

На следующем этапе спланированы и проведены десять серий полных факторных экспериментов на двух уровнях варьирования с тремя факторами. Количество серий определено количеством сочетаний из шести имеющихся в рассмотрении факторов по три. Это вызвано тем, что получение полиномиальной зависимости главной составляющей силы резания от шести факторов в условиях полного факторного эксперимента требует большого числа опытов. Использование дробного факторного эксперимента определяет наличие смешанных оценок. Результаты трехфакторных экспериментов дают предварительную оценку наличия или отсутствия совместного влияния факторов на главную составляющую силы резания и позволят так спланировать дробный факторный эксперимент, чтобы коэффициенты регрессии достоверно отображали влияние линейных эффектов и эффектов взаимодействия.

Статистические оценки коэффициентов полиномиальных зависимостей главной составляющей силы резания от параметров обработки, полученные в результате обработки экспериментальных данных, позволят определить степень влияния факторов и их взаимодействий на результат исключительно на основании строгих математических оценок.

Факторы, их уровни и постоянные параметры для проведения полных факторных экспериментов представлены в табл. 2. Для удобства обработки экспериментальных данных уровни факторов кодированы: +1 — верхний уровень; -1 — нижний уровень. Это определило симметричность планов относительно центра эксперимента, планы нормированы, т.е. сумма квадратов элементов любого столбца равна числу опытов, и удовлетворяют условию ортогональности. Указанные свойства планов значительно упростили используемый математический аппарат.

В качестве математической модели выбран полином первой степени. Для трех факторов это уравнение выглядит следующим образом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

При обработке результатов экспериментов во всех сериях установлена однородность дисперсий опытов с помощью  $G$ -критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости. Определены коэффициенты, характеризующие линейные эффекты и эффекты взаимодействия.

В результате обработки данных экспериментов № 1—10 получены полиномы для составляющей  $P_z$ , которые приведены в табл. 3.

Таблица 2

## Факторы и уровни полных факторных экспериментов при точении

№ серии	Факторы	Коды	Уровни факторов		Постоянные параметры	№ серии	Факторы	Коды	Уровни факторов		Постоянные параметры
			нижний (-1)	верхний (+1)					нижний (-1)	верхний (+1)	
1	$t$ $S_0$ $v$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,5 0,097 57	2 0,39 142	$\gamma = 0$ $h_3 = 0,75$	6	$t$ $\gamma$ $h_3$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,5 0 0	2 15 0,75	$S_0 = 0,097$ $v = 137$
2	$t$ $S_0$ $\gamma$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,5 0,097 0	2 0,39 15	$v = 142$ $h_3 = 0$	7	$S_0$ $v$ $\gamma$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,097 59 0	0,39 147 15	$t = 2$ $h_3 = 0,75$
3	$t$ $S_0$ $h_3$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,5 0,097 0	2 0,39 0,75	$v = 142$ $\gamma = 15$	8	$S_0$ $v$ $h_3$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,097 59 0	0,39 147 0,75	$t = 2$ $\gamma = 0$
4	$t$ $v$ $\gamma$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,5 57 0	2 142 15	$S_0 = 0,097$ $h_3 = 0,75$	9	$S_0$ $\gamma$ $h_3$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,097 0 0	0,39 15 0,75	$t = 2$ $v = 141$
5	$t$ $v$ $h_3$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	0,5 59 0	2 147 0,75	$S_0 = 0,097$ $\gamma = 0$	10	$v$ $\gamma$ $h_3$	$x_1$ $x_2$ $x_3$	57 0 0	142 15 0,75	$t = 2$ $S_0 = 0,097$

Проверка значимости коэффициентов с помощью  $t$ -критерия Стьюдента при 5% уровне значимости позволила выявить незначимые коэффициенты и исключить их из полиномов. По  $F$ -критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости установлена адекватность полученных моделей.

Таблица 3

Виды полиномов для составляющей  $P_2$ 

№	Факторы	Модель $P_2$
1	$t - S_0 - v$	$y = 728,71 + 425,70 x_1 + 294,95 x_2 + 79,30 x_3 + 170,57 x_1 x_2 + 48,89 x_1 x_3 - 55,54 x_2 x_3 - 36,71 x_1 x_2 x_3$
2	$t - S_0 - \gamma$	$y = 580,86 + 333,72 x_1 + 289,23 x_2 - 51,91 x_3 + 173,91 x_1 x_2 - 30,78 x_1 x_3 - 8,74 x_2 x_3 - 5,33 x_1 x_2 x_3$
3	$t - S_0 - h_3$	$y = 562,21 + 306,06 x_1 + 283,02 x_2 + 13,85 x_3 + 153,30 x_1 x_2 + 17,87 x_1 x_3 - 3,10 x_2 x_3 + 8,34 x_1 x_2 x_3$
4	$t - v - \gamma$	$y = 394,18 + 209,05 x_1 + 96,76 x_2 - 36,53 x_3 + 51,70 x_1 x_2 - 25,39 x_1 x_3 - 40,88 x_2 x_3 - 26,13 x_1 x_2 x_3$
5	$t - v - h_3$	$y = 332,89 + 191,11 x_1 + 58,54 x_2 + 41,24 x_3 + 36,39 x_1 x_2 + 32,36 x_1 x_3 + 35,54 x_2 x_3 + 23,89 x_1 x_2 x_3$
6	$t - \gamma - h_3$	$y = 418,23 + 207,06 x_1 - 23,02 x_2 + 90,19 x_3 - 27,03 x_1 x_2 + 50,45 x_1 x_3 - 29,25 x_2 x_3 - 9,78 x_1 x_2 x_3$
7	$S_0 - v - \gamma$	$y = 983,44 + 426,84 x_1 + 53,22 x_2 - 82,16 x_3 - 59,91 x_1 x_2 - 31,21 x_1 x_3 - 18,17 x_2 x_3 + 33,42 x_1 x_2 x_3$
8	$S_0 - v - h_3$	$y = 1006,86 + 484,90 x_1 + 11,81 x_2 + 32,37 x_3 - 59,48 x_1 x_2 - 12,73 x_1 x_3 + 38,08 x_2 x_3 - 20,60 x_1 x_2 x_3$
9	$S_0 - \gamma - h_3$	$y = 944,82 + 440,13 x_1 - 47,76 x_2 + 51,06 x_3 - 11,19 x_1 x_2 - 16,72 x_1 x_3 - 14,22 x_2 x_3 - 14,30 x_1 x_2 x_3$
10	$v - \gamma - h_3$	$y = 538,03 + 81,84 x_1 - 32,50 x_2 + 66,25 x_3 - 36,51 x_1 x_2 + 66,00 x_1 x_3 - 36,61 x_2 x_3 - 27,46 x_1 x_2 x_3$

В табл. 4 представлены значения коэффициентов в кодированном виде перед линейными эффектами и эффектами парного взаимодействия и дана их оценка при 5%-ном уровне значимости (здесь и далее  $t_p$  — расчетное значение критерия,  $t_T$  — табличное значение критерия при 5%-ном уровне значимости).



Установлено, что в двух случаях из трех незначимым является коэффициент перед кодированным парным эффектом  $S_0 - h_3$ , незначимые или близки к критическому значению коэффициенты перед кодированными парными эффектами  $S_0 - \gamma$  и  $v - \gamma$  и линейным эффектом  $v$ . Наибольшие номинальные значения коэффициентов получены перед кодированными линейными эффектами глубины резания  $t$  и подачи  $S_0$ , а также кодированным эффектом парного взаимодействия  $t - S_0$ . Номинальные значения коэффициентов перед кодированными факторами  $v$ ,  $h_3$ ,  $\gamma$  и сочетаниями  $S_0 - v$ ,  $v - h_3$ ,  $t - v$  можно оценивать как близкие по значению и силе влияния и более сильные, чем сочетания  $t - h_3$ ,  $v - \gamma$ ,  $t - \gamma$  и  $\gamma - h_3$ . Аналогично проанализированы тройные взаимодействия, значения коэффициентов перед которыми в таблице не приведены.

Другой показатель для сравнения оценки влияния факторов — это коэффициенты парной корреляции  $r_{xyj}$  между функцией отклика  $y$  и изучаемым фактором  $x_j$ . Расчеты выполнены по формуле [8]

$$r_{xyj} = Q_{xyj} / \sqrt{Q_{xj} Q_y},$$

где  $Q_{xyj} = \sum x_j y - (1/n)(\sum x_j)(\sum y)$ ;  $Q_{xj} = \sum x_j^2 - (1/n)(\sum x_j)^2$ ;  $Q_y = \sum y^2 - (1/n)(\sum y)^2$ .

В рассматриваемой серии экспериментов линейные эффекты встречаются по шесть раз, а парное взаимодействие — по три. В табл. 5 приведены значения коэффициентов корреляции и дана оценка их значимости. Оценка значимости коэффициента парной корреляции (проверка наличия корреляции) проведена по формуле, где граница значимости  $t_p$  установлена на основании распределения Стьюдента при 5%-ном уровне значимости

$$t_p = \frac{r_{xyj} \sqrt{n-2}}{1-r_{xyj}^2} \geq t_p.$$

Анализ оценки значимости коэффициентов корреляции указывает на наличие корреляции между факторами и функцией отклика в нескольких сериях эксперимента для линейных эффектов  $t$ ,  $S_0$  и парных взаимодействий  $t - S_0$ ,  $t - v$ ,  $S_0 - v$ ,  $t - h_3$ ,  $v - h_3$ .

В результате математической обработки десяти серий экспериментов с учетом двух показателей сравнения оценки влияния факторов выявлено: существуют двойные и тройные взаимодействия, совместное влияние которых на главную составляющую силы резания проявляется стабильно во всех сочетаниях параметров обработки; это сочетания глубина резания — подача ( $t - S_0$ ); подача — скорость резания ( $S_0 - v$ ); глубина резания — скорость резания ( $t - v$ ); глубина резания — подача — скорость резания ( $t - S_0 - v$ ); глубина резания — скорость резания — передний угол ( $t - v - \gamma$ ); глубина резания — скорость резания — износ по задней поверхности ( $t - v - h_3$ ); при планировании дробного факторного эксперимента можно пренебречь (или учесть их в смешанной оценке) совместным влиянием следующих сочетаний факторов:  $v$  и  $\gamma$ ,  $t - \gamma$ ,  $\gamma - h_3$ ,  $S_0 - \gamma$ ;  $S_0 - \gamma - h_3$ ;  $S_0 - v - \gamma$ ;  $S_0 - v - h_3$ ;  $t - \gamma - h_3$ ;  $t - S_0 - \gamma$ ;  $t - S_0 - h_3$ , а также совместным влиянием большего числа факторов; для ряда линейных эффектов и парных взаимодействий статистические оценки не дают однозначного ответа о степени влияния и наличии совместного влияния, так как зависят от других факторов, включенных в эксперимент, что может быть исключено при варьировании сразу всеми факторами.

Полученные результаты определили необходимость проведения шестифакторного эксперимента и позволили составить план дробной реплики с учетом сочетаний, не оказывающих совместного влияния на главную составляющую силы резания.

Спланирована и проведена  $j$ -реплика  $2^{6-2}$  от полного факторного эксперимента  $2^6$  с заменой  $x_1 x_2 x_3 x_4$  новым фактором  $x_5$  и  $x_2 x_3 x_4$  новым фактором  $x_6$ . В связи с тем, что в дроб-

ных репликах часть взаимодействий заменена новыми факторами, найденные коэффициенты уравнения регрессии будут являться совместными оценками линейных эффектов и эффектов взаимодействия.

На основании генерирующих соотношений написаны определяющие контрасты и разработана схема смешивания оценок. После анализа смешанных оценок назначены номера кодов факторов в соответствии с полученными ранее фактами наличия или отсутствия совместного влияния, а также значения нижнего и верхнего уровней факторов. Информация сведена в табл. 6.

В результате обработки эксперимента был получен полином первой степени

$$y = 536,7 + 271,7 x_1 + 3,2 x_2 + 318,6 x_3 - 25,9 x_4 - 43,8 x_5 - 22,4 x_6 - 25,3 x_1 x_2 + 170,8 x_1 x_3 + 18,3 x_1 x_4 - 11,7 x_2 x_3 - 0,9 x_2 x_4 + 29,6 x_3 x_4 - 5,2 x_1 x_2 x_3 - 16,9 x_1 x_2 x_4 + 16,1 x_1 x_3 x_4$$

Таблица 6

Исходные данные для шестифакторного эксперимента

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов	
		нижний (-1)	верхний (+1)
$S_0$ , мм/об	$x_1$	0,097	0,39
$v$ , м/с	$x_2$	0,8	2,6
$t$ , мм	$x_3$	0,5	2
<b>НВ</b>	$x_4$	200	250
$\gamma$ , град	$x_5$	0	15
$h$ , мм	$x_6$	0,16	0,8

Проверка полинома по  $F$ -критерию Фишера показала его адекватность. Проверка по  $t$ -критерию Стьюдента установила, что коэффициенты регрессии  $b_2$  и  $b_{24}$  незначимые. На основе определяющего контраста выявлена схема смешивания оценок:

$$\begin{aligned}
 b_1 &\rightarrow \beta_1 + \beta_{2345} + \beta_{12346} + \beta_{56} & b_6 &\rightarrow \beta_6 + \beta_{123456} + \beta_{234} + \beta_{15} & b_{24} &\rightarrow \beta_{24} + \beta_{135} + \beta_{36} + \beta_{12456} \\
 b_2 &\rightarrow \beta_2 + \beta_{1345} + \beta_{346} + \beta_{1256} & b_{12} &\rightarrow \beta_{12} + \beta_{345} + \beta_{1346} + \beta_{256} & b_{34} &\rightarrow \beta_{34} + \beta_{125} + \beta_{26} + \beta_{13456} \\
 b_3 &\rightarrow \beta_3 + \beta_{1245} + \beta_{246} + \beta_{1356} & b_{13} &\rightarrow \beta_{13} + \beta_{245} + \beta_{1246} + \beta_{356} & b_{123} &\rightarrow \beta_{123} + \beta_{45} + \beta_{146} + \beta_{2356} \\
 b_4 &\rightarrow \beta_4 + \beta_{1235} + \beta_{236} + \beta_{1456} & b_{14} &\rightarrow \beta_{14} + \beta_{235} + \beta_{1236} + \beta_{456} & b_{124} &\rightarrow \beta_{124} + \beta_{35} + \beta_{1236} + \beta_{2456} \\
 b_5 &\rightarrow \beta_5 + \beta_{1234} + \beta_{23456} + \beta_{16} & b_{23} &\rightarrow \beta_{23} + \beta_{145} + \beta_{46} + \beta_{12356} & b_{134} &\rightarrow \beta_{134} + \beta_{25} + \beta_{126} + \beta_{3456}
 \end{aligned}$$

Проведен анализ значимости величин  $\beta$  по результатам предварительных трехфакторных экспериментов и коэффициенту корреляции факторов и функции отклика. При переходе к натуральным значениям в уравнение вставлены факторы, оказывающие наибольшее воздействие на функцию отклика.

После проведенных преобразований получена итоговая формула:

$$\begin{aligned}
 P_{\bar{z}} &= 528,226 - 999,129 S_0 - 3,217 v + 77,550 t - 3,610 \text{ НВ} + 4,972 \gamma + 491,007 h_3 + \\
 &+ 19,810 S_0 v + 508,502 S_0 t + 6,725 S_0 \text{ НВ} - 20,419 S_0 \gamma - 934,655 S_0 h_3 - 0,645 v t +
 \end{aligned}$$

$$+ 0,021 v \text{ HB} - 2,570 v h_3 + 0,155 t \text{ HB} - 210,735 t h_3 - 2,629 S_0 v t - 0,088 S_0 v \text{ HB} + \\ + 5,845 S_0 t \text{ HB} + 2,056 v t h_3.$$

Для качественной оценки полинома (2) проведено измерение составляющих силы резания в точках заданного факторного пространства, но не входящих в план. Условия экспериментов и результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений сведены в табл. 7.

Выявленная погрешность между экспериментальными и расчетными значениями удовлетворяет требованиям к инженерным расчетам.

Таблица 7

Результаты экспериментов в случайных точках описанного факторного пространства и сравнение их с расчетными значениями

№	$S_0$ , мм/об	$v$ , м/с	$t$ , мм	HB	$\gamma$ , град	$h_3$ , мм	$P_z$ сред. Н	Расчетные значения по (2)	Относительная погрешность, %
1	0,195	1,6	0,5	250	15	0,8	185	177	4,65
2	0,26	1,6	1	200	15	0,8	481	456	5,33

### Выводы

1. Экспериментально доказано наличие совместного влияния параметров механической обработки на величину составляющих силы резания при точении. Установлено, что существуют двойные и тройные взаимодействия, совместное влияние которых на главную составляющую силы резания проявляется стабильно во всех сочетаниях параметров обработки. Это сочетания: глубина резания — подача ( $t - S_0$ ); подача — скорость резания ( $S_0 - v$ ); глубина резания — скорость резания ( $t - v$ ); глубина резания — износ по задней поверхности ( $t - h_3$ ); скорость резания — износ по задней поверхности ( $v - h_3$ ); глубина резания — подача — скорость резания ( $t - S_0 - v$ ); подача — скорость резания — твердость материала ( $S_0 - v - \text{HB}$ ); глубина резания — подача — твердость материала ( $t - S_0 - \text{HB}$ ); глубина резания — скорость резания — износ по задней поверхности ( $t - v - h_3$ ).

2. Совместное влияние глубины резания и подачи при токарной обработке соизмеримо с самостоятельным влиянием указанных факторов и превосходит влияние остальных линейных эффектов.

3. Полиномиальная модель, учитывающая совместное влияние параметров обработки на главную составляющую силы резания, позволяет получить результаты, погрешность которых значительно ниже погрешности расчетов по степенным моделям типа

$P_z = C_p t^x S_0^y \text{HB}^n k_p$  или  $P_z = C_p t^x S_0^y v^n k_p$  уже при планировании эксперимента на двух уровнях в широком диапазоне параметров черновой и получистовой обработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. / Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1985—1986. — Т. 2. — 1985. — 496 с.
2. Режимы резания металлов: Справочник / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич и др.; Под ред. А.Д. Корчемкина. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: НИИТавтопром, 1995. — 456 с.



3. Резание металлов / Г.И. Грановский, П.П. Грудов, В.А. Кривоухов и др.; Под ред. В.А. Кривоухова. — М.: Машгиз, 1954. — 472 с.
4. Режимы резания металлов инструментами из быстрорежущей стали (для одноинструментальной обработки). — М.: Машгиз, 1950. — 340 с.
5. Грановский Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. — М.: Машиностроение, 1982. — 112 с.
6. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. — М.: Машгиз, 1956. — 368 с.
7. Зорев Н. Н. Расчет проекций силы резания. — М.: Машгиз, 1958. — 56 с.
8. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1982. — 224 с.

620.19

## АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Асп. К. Е. НАГИНАЕВ, д-р физ.-мат. наук, проф. В. Н. САВЕЛЬЕВ

*Приведены результаты исследования статического нагружения плоских образцов, изготовленных из стали 09Г2С-12, в режиме постоянной скорости нагружения на различных этапах: деформации вплоть до разрушения образцов с записью сигналов акустической эмиссии. Метод акустической эмиссии надежно выявляет момент образования и контролирует стадию развития очага разрушения (макротрещину) независимо от наличия или отсутствия концентратора напряжений в образце.*

*Research data from static loading tests of flat samples made of steel 09G2C-12 in conditions of fixed loading speed and at different stages of deformation up to destruction with measurement of the acoustic emission and the recording of signals are presented in this article. Application of acoustic emission technology can easily determine the moment of formation and inspect any stage of development of the center of destruction (macro flaw) irrespective of the presence or absence of voltage generator in the sample.*

Наиболее часто разрушение производственных объектов связано с развитием дефектов, образовавшихся при изготовлении, транспортировании или монтаже оборудования, поэтому выявление и исследование развивающихся при эксплуатационных нагрузках дефектов типа трещин, оценка степени их опасности является достаточно актуальной не только с научной, но и с технической точки зрения. Наиболее достоверную информацию о развитии трещин как в образцах, так и в технологическом оборудовании дает метод акустической эмиссии (АЭ). Наличие и оценка влияния реальных дефектов в металле промышленных объектов моделировалась нами искусственно созданными концентраторами в образцах. Исследования проводились на плоских образцах по ГОСТ 1497-84 [1] (далее — образцы) и ГОСТ 25.506-85 [2] (далее — образцы с концентратором), изготовленных из стали 09Г2С-12, в режиме статического нагружения. Из данного материала (или его импортных аналогов) изготовлена подавляющая часть корпусов емкостного оборудования различных типов отечественного и импортного производства, установленного на предприятиях ОАО «Газпром», при техническом диагностировании которых выявляются многочисленные дефекты изготовления и монтажа.

Образцы имели форму двойной лопатки с габаритными размерами 0,295×0,04×0,01 м, длина и ширина рабочей части соответственно 0,135 и 0,03 м. Образцы с концентратором — прямоугольные пластины 0,5×0,1×0,01 м с отверстием диаметром 0,03 м посередине, от которого поперек рабочей части образца отходят две риски, представляющие собой концентраторы напряжений (расстояние между вершинами рисок 0,04 м).