

М. В. КАСЬЯН, Г. С. МИНАСЯН, Г. Б. БАГДАСАРЯН, Г. А. АРУТЮНЯН

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ БЕЗВЕРШИННОГО РЕЗЦА БРМ-1

Конструкция безвершинного резца БРМ-1 существенно отличается от конструкции обычных резцов. При применении резца БРМ-1, по сравнению с обычным резцом, выявляется ряд особенностей, в частности: уменьшается шероховатость обработанной поверхности, резко снижается глубина упрочнения металла за линией среза; в значительной степени уменьшается микротвердость поверхности. Кроме того, заметным образом увеличивается износостойкость режущего инструмента и снижается деформация срезаемого слоя.

Основные положения о безвершинном резце в достаточной степени освещены в [1, 2, 3, 4, 5]. Целью проведенных нами исследований является, базируясь на статистическом методе планирования экспериментов, сравнение обычного и безвершинного резцов с точки зрения различного их влияния на ряд явлений, сопутствующих процессу резания.

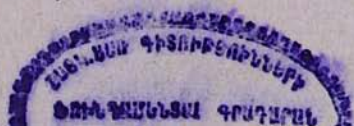
Следует отметить, что содержание первого параграфа в сжатой форме ранее было опубликовано в [6]. Однако ввиду того, что настоящая работа носит комплексный характер, для обобщения некоторых результатов исследований целесообразно включение указанной части в данную статью.

§ 1. Построение модели для расчета составляющих силы резания при точении безвершинным и обычным резцами

Нашей задачей является определение характера и степени влияния конструкции и геометрических параметров обычного и безвершинного резцов на составляющие силы резания, с помощью статистического планирования экспериментов, при одних и тех же условиях работы.

Для планирования эксперимента по некоторой, заранее составленной схеме процесс исследования разбивается на отдельные этапы. При этом часть рассматриваемых факторов отсеивается, так как они не могут вносить существенного вклада при планировании эксперимента.

Традиционными методами исследования можно, конечно, получить такие же результаты, как и статистическим методом планирования. Однако там нет четкости, логически упорядоченной стратегии, и исследователь ведет поиск экстремума, руководствуясь только своей интуицией. Это приводит, как правило, к постановке многих лишних опытов. По-



этому составление математической модели для каждого из этих резцов заранее разрешает использование принципа факторного эксперимента типа 3^n .

Одновременно для проверки и сравнения полученных результатов можно проводить эксперименты двумя методами: статистическим и традиционным. При этом рассматривается влияние трех факторов: V , S , t на составляющие силы резания P_z , P_y и P_x .

В традиционном методе исследования влияние V , S , t на силы P_z , P_y , P_x изучается в отдельности, т. е. два фактора остаются постоянными и изменяется в широком диапазоне только один фактор, что, как известно, влечет за собой определенные ошибки.

Для получения достоверных результатов при исследовании статистическим методом эксперименты нужно ставить так, чтобы в отличие от традиционных методов варьировать всеми факторами одновременно.

В данном случае рассматривается факторный эксперимент 3^3 , т. е. такой эксперимент, где участвуют три фактора на трех фиксированных уровнях, с повторением каждого эксперимента три раза. Однако, так как получается большое число экспериментов ($3^3 = 3 \times 3 \times 3 = 27$), приходится несколько ограничивать рандомизацию и рассматривать факторный эксперимент 3^3 с разбиением на блоки, число которых кратно трем. Каждый блок имеет по девять комбинаций условий и выделяется на 13 эффектов с двумя степенями свободы: V , S , t , VS , VS^2 , Vt , Vt^2 , St , St^2 , VSt , VS^2t , VSt^2 и VS^2t^2 .

Если смешать взаимодействие VS^2t^2 с тремя блоками и реализовать лишь один из этих блоков, то совместными эффектами будут являться [7]:

$$V = V(VSt^2) = V^2St^2 = VS^2t \quad \text{и}$$

$$V = V(VSt^2)^2 = V^3S^2t^4 = S^2t = S^4t^2 = St^2.$$

$$S = S(VSt^2) = VS^2t^2 \quad \text{и}$$

$$S = S(VSt^2)^2 = V^2S^3t^4 = V^4t^8 = Vt^2.$$

$$t = t(VSt^2) = VSt^3 = VS \quad \text{и}$$

$$t = t(VSt^2)^2 = V^2S^2t^5 = V^4S^4t^{10} = VSt.$$

$$VS^2 = VS^2(VSt^2) V^2S^3t^2 = V^4S^6t^4 = Vt \quad \text{и}$$

$$VS^2 = VS^2(VSt^2)^2 = V^3S^4t^4 = St.$$

Таким образом, план третьереплики факторного эксперимента 3^3 получается (см. табл. 1).

Результаты исследования для двух резцов приведены в табл. 2. После проведения экспериментов составляется математическая модель зависимости сил резания от вышеперечисленных факторов в следующих общих видах:

$$P_z = C_z V^{z_1} S^{z_2} t^{z_3} \quad (1)$$

$$P_y = C_y V^{y_1} S^{y_2} t^{y_3} \quad (2)$$

$$P_x = C_x V^{x_1} S^{x_2} t^{x_3} \quad (3)$$

Таблица 1

$V, \text{м/мин}$	$S, \text{мм/об}$	$t, \text{мм}$	К-во эксперимен- тов
10	0,07	1,0	9
100	0,07	0,25	
220	0,07	0,5	
10	0,21	0,25	
100	0,21	0,5	
220	0,21	1,0	
10	0,3	0,5	
100	0,3	1,0	
220	0,3	0,25	

Таблица 2*

№ экс.	$V, \text{м/мин}$	$S, \text{мм/об}$	$t, \text{мм}$	Резец БРМ-1			Обычный резец		
				$P_z, \text{кг}$	$P_y, \text{кг}$	$P_x, \text{кг}$	$P_z, \text{кг}$	$P_y, \text{кг}$	$P_x, \text{кг}$
1	10	0,07	1,0	33,9	17,9	6,2	23,2	12,3	4,3
2	100	0,07	0,25	11,4	6,4	2,1	5,4	2,9	1,1
3	220	0,07	0,5	17,0	9,0	3,2	10,5	5,6	2,1
4	10	0,21	0,25	28,6	15,1	5,3	13,8	7,3	2,6
5	100	0,21	0,5	37,9	20,1	7,0	26,0	13,8	4,8
6	220	0,21	1,0	57,0	30,2	10,6	50,2	26,6	9,3
7	10	0,30	0,5	57,9	30,4	10,7	36,6	19,4	6,8
8	100	0,30	1,0	76,6	40,6	14,2	68,9	36,5	12,8
9	220	0,30	0,25	28,9	15,3	5,4	16,6	8,7	3,1

Для определения показателей степеней $Z_1, Z_2, Z_3, Y_1, Y_2, Y_3, X_1, X_2, X_3$, а также коэффициентов C_z, C_y, C_x , был использован метод наименьших квадратов. Логарифмируя (1), (2), (3) и вводя соответствующие обозначения, получаем

$$P_1 = C_1 + Z_1 V_1 + Z_2 S_1 + Z_3 t_1, \quad (4)$$

$$P_2 = C_2 + Y_1 V_1 + Y_2 S_1 + Y_3 t_1, \quad (5)$$

$$P_3 = C_3 + X_1 V_1 + X_2 S_1 + X_3 t_1. \quad (6)$$

Применяя условия Гаусса для (4), (5), (6) и программируя на ЭВМ «Наири-2», получаем все неизвестные коэффициенты и степени, которые дают возможность представить уравнения (1), (2), (3) в окончательном виде.

Для БРМ-1 и для обычного резца

$$P_z = \frac{244 S^{0,68} t^{0,67}}{V^{0,073}}, \quad P_y = \frac{136,5 S^{0,56} t^{0,73}}{V^{0,091}},$$

* В табл. 2 приведены средние значения составляющих силы резания от трех наблюдений каждого эксперимента.

$$P_x = \frac{-102 S^{0,99} t^{0,63}}{V^{0,035}}, \quad (7)$$

$$P_z = \frac{212 S^{0,8} t^{1,01}}{V^{0,35}}, \quad P_y = \frac{74,4 S^{0,69} t^{0,9}}{V^{0,015}}.$$

$$P_x = \frac{49,7 S^{0,63} t^{0,92}}{V^{0,01}}. \quad (8)$$

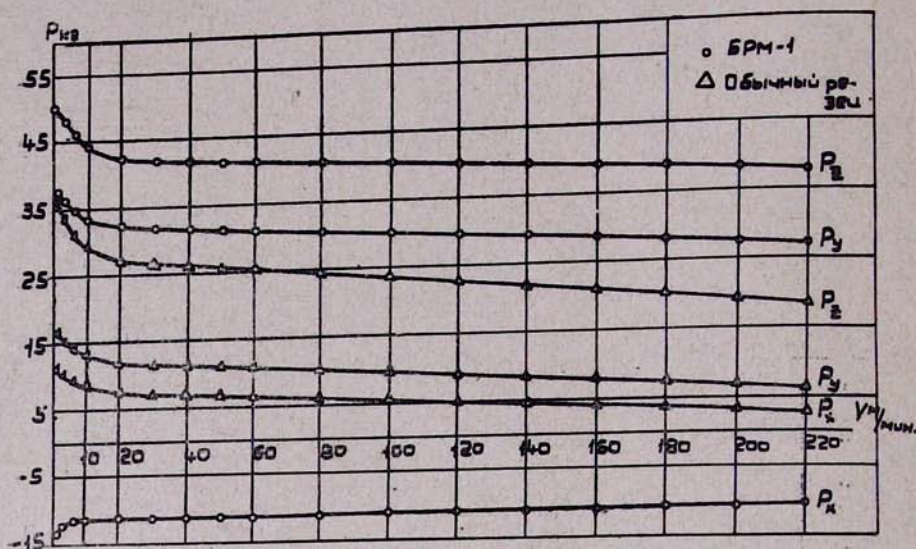


Рис. 1. Влияние скорости резания на составляющие силы резания P_z , P_y и P_x .

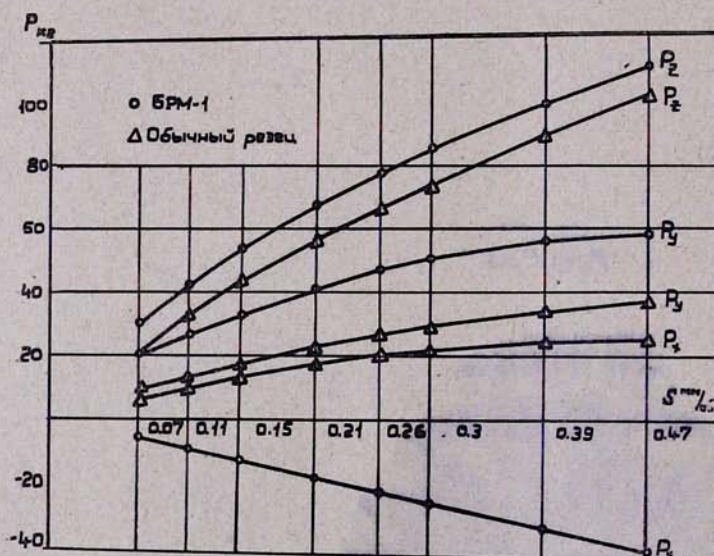


Рис. 2. Влияние подачи на составляющие силы резания P_z , P_y и P_x .

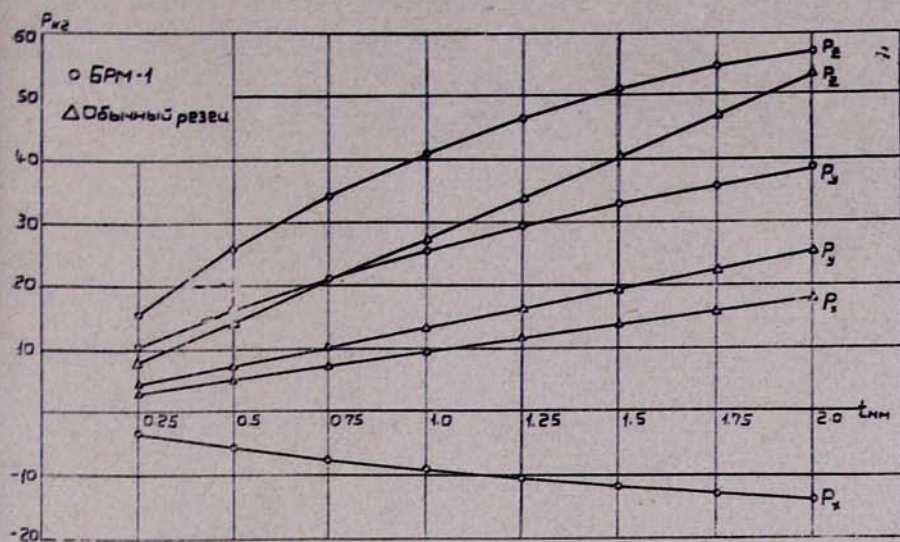


Рис. 3. Влияние глубины резания на составляющие силы резания P_z , P_y и P_x .

На графиках (рис. 1, 2, 3) приведены результаты исследований зависимостей P_z , P_y , P_x от V , S и t двумя методами.

Однако для полной достоверности результатов производится проверка гипотезы влияния режимов резания на составляющие силы резания методом дисперсионного анализа. Исходя из плана исследований, оставшиеся 9 экспериментов (табл. 1) можно объединить теперь по уровням фактора t , применяя следующие обозначения (см. табл. 3):

Таблица 3

Фактор	Ф а к т о р		
	0	1	2
0	2	0	1
1	0	1	2
2	1	2	0

При проверке гипотезы рассматривается анализ только для силы P_z (резец БРМ-1). Этот пример можно аналогично осуществлять для сил P_y и P_x , а также при исследовании составляющих силы резания обычными резцами. Для дисперсионного анализа в табл. 4 приведены значения силы P_z . Эти величины можно предварительно закодировать, вычитывая 39 из каждого показания (при этом F статистики не меняется).

Таблица 4

Фактор S	Ф а к т о р V			$T_{..k}$
	10 0	100 1	220 2	
0,07 0	-5	-28	-22	-55
0,21 1	-10	-1	18	7
0,3 2	19	38	-10	47
$T_{i...}$	4	9	-14	$T_{...} = -1$
$T_{.j.}$	по 0,25 -48	по 0,5 -4	по 1,0 -51	

$$SS_{об.} = (-5)^2 + (-10)^2 + \dots + (-10)^2 - \frac{(-1)^2}{9} = 3622,9,$$

$$SS_{изм.б.} = \sum_{k=1}^3 \frac{T_{...k}^2}{3} - \frac{T_{...}^2}{9} = \frac{5283}{3} - \frac{1}{9} = 1760,9,$$

$$SS_{ис.вар.} = \sum_{j=1}^3 \frac{T_{.j.}^2}{3} - \frac{T_{...}^2}{9} = \frac{4921}{3} - \frac{1}{9} = 1640,2,$$

$$SS_{пол.} = \sum_{i=1}^3 \frac{T_{i..}^2}{3} - \frac{T_{...}^2}{9} = \frac{293}{3} - \frac{1}{9} = 97,9,$$

$$SS_{ош.} = SS_{об.} - SS_{изм.бл.} - SS_{исп.вар.} - SS_{пол.} = 123,9.$$

Результаты дисперсионного анализа для данного примера с полным блочным планированием латинского квадрата приведены в табл. 5.

Таблица 5

Источник изменчивости	Число степеней своб.	Сумма квадратов	Средний квадрат
Блок испытаний	2	1760,9	880,4
Испытание вариантов	2	1640,2	820,1
Положение	2	97,9	48,95
Ошибка	2	123,9	61,95
Итого	8	3622,9	

Используя приведенные выше результаты, можно проверить три следующие гипотезы:

$$H_1: S = 0 \quad (\text{нет влияния подачи})$$

$$F_{2;2} = \frac{880,9}{61,95} = 14,2.$$

Эта величина значима при 1%-ном уровне значимости [8]. Гипотеза отвергается.

$$H_2: t = 0 \quad (\text{нет влияния глубины резания})$$

$$F_{2,2} = \frac{820,1}{61,95} = 13,2$$

Эта величина значима при 1%-ном уровне значимости. Гипотеза отвергается.

Таблица 6

Неизмен- ные пара- метры	Перемен- ный пара- метр	P_z , кг			P_y , кг			P_x , кг		
		град.	стат.	%	град.	стат.	%	град.	стат.	%
$S = 0,11$ мм/об, $t = 1,0$ мм	3	49,2	50,1	1,7	34,6	35,9	3,6	12,4	11,8	4,8
	10	45,8	45,1	1,5	32,5	32,1	1,2	11,5	11,3	1,7
	30	42,6	41,5	2,3	32,5	29,1	10,4	11,2	10,9	2,6
	50	39,2	39,6	1,0	28,6	27,7	3,1	11,2	10,7	4,5
	80	37,9	38,3	4,1	25,2	26,6	5,2	11,1	10,5	5,4
	120	38	37,5	1,3	23,8	25,6	7,0	10,3	10,3	0,0
	160	38,2	36,7	3,9	24,4	25,1	3,0	9,7	10,1	4,0
	200	35,8	35,9	0,3	24,4	24,4	0,0	9,6	9,9	3,0
$V = 80$ м/мин, $t = 1,0$ мм, $S = 0,11$ мм/об	0,07	30,5	29,2	4,2	20,7	20,6	0,5	6,3	6,2	1,5
	0,11	39,4	39,5	0,3	28,1	26,6	5,3	11,1	10,1	9,0
	0,15	48,4	48,6	0,8	35,3	31,7	10,1	15,2	13,9	8,5
	0,21	62,4	61,4	1,6	39,5	38,2	3,2	22,4	18,9	15,0
	0,26	71,6	70,4	1,6	41,5	42,8	1,6	25,7	23,0	10,5
	0,3	84,6	78,2	7,5	43,9	46,7	6,0	28,9	26,2	9,3
	0,39	107,3	93,1	13,0	48,3	54,0	10,5	34,8	34,1	2,0
	0,25	15,2	15,7	3	10,9	9,7	11,0	3,93	4,1	4,8
$V = 80$ м/мин, $S = 0,11$ мм/об	0,5	23,7	24,7	4	18,2	16	12,0	6,8	6,2	8,8
	0,75	32,0	32,5	1,5	23,9	21,6	9,6	8,83	8,0	9,0
	1,0	38,3	39,4	2,7	29,7	26,6	10,4	10,3	9,6	6,8
	1,25	44,4	45,7	2,8	35,3	31,3	11,3	12,2	11,0	9,8
	1,5	52,2	51,6	1,1	40,4	35,8	11,3	13,4	12,4	7,4
	1,75	58,3	57,3	1,7	45,5	40,0	9,8	13,7	13,7	0,0

$$H_3: V = 0 \quad (\text{нет влияния скорости резания})$$

$$F_{2,2} = \frac{48,95}{61,95} = 0,79.$$

Гипотеза не отвергается, так как эта величина не значима при 1%-ном уровне значимости.

Таким образом, анализ показал существенное влияние S и t на силу резания, что подтверждается вычислением величины F статистики.

Скорость резания при этом влияет на составляющие силы резания незначительно, что подтверждается вычислением F , а также экспериментом (рис. 1).

Приведенная выше процедура была применена также для обычного резца. Проверка гипотез показала, что влияние V , S и t на составляющие силы резания существенно.

Для подтверждения адекватности модели и для доказательства эффективности запланированных экспериментов проведены также несколько экспериментов (для БРМ-1) традиционным методом (табл. 6).

Сравнение расчетных и наблюдаемых значений сил ясно показывает, что модель хорошо описывает характер изменения силы резания при обработке резцом БРМ-1. В табл. 6 приведены некоторые характерные значения наблюдаемой и расчетной составляющих силы резания. Разность между наблюдаемыми и расчетными значениями силы резания составляет 3—5%, за исключением областей больших подач и глубины резания, где несовпадение достигает 15%. Это расхождение обусловлено тем, что в запланированных экспериментах для оценки параметров шаг на уровнях был значительно больше, что и привело к плохой оценке в этих интервалах.

§ 2. Исследование упрочнения металла за линией среза обычным и безвершинным резцами

Целью проведенных исследований является установление функциональных зависимостей показателей упрочнения обработанной поверхности (микротвердость и глубина упрочнения) от режимов резания.

Характерная особенность проведенных исследований — изучение упрочнения металла за линией среза статистическим планированием.

Опыты проводились при точении обычным ($\gamma=10^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\alpha=6^\circ$) и безвершинным резцами, оснащенными пластинками из твердого сплава Т15К6. В качестве обрабатываемого материала применялась сталь 45. Микротвердость, с целью определения глубины упрочнения и микротвердости обработанной поверхности, измерялась на микротвердомере типа ПМТ-3. Уколы пирамиды наносились на специально изготовленные шлифы-лыски, окончательно доведенные алмазной пастой М7. Величина глубины упрочнения подсчитывалась по известной в литературе формуле.

Следует отметить, что нам трудно заранее установить функциональный вид уравнений, по которым можно будет рассчитать микротвердость и глубину упрочнения поверхности, обработанной вышеупомянутыми резцами. Однако на основании многочисленных экспериментов, прове-

сделанных различными авторами, можно ожидать, что получающаяся модель должна быть нелинейной.

Модель, предложенная из теоретических соображений, связывающая микротвердость (H) и глубину упрочнения (h) с режимами резания, имеет вид:

$$\begin{aligned} H &= C_H V^{Z_1} S^{Z_2} t^{Z_3}, \\ h &= C_h V^{Y_1} S^{Y_2} t^{Y_3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для определения значений коэф. $Z_1, Z_2, Z_3, Y_1, Y_2, Y_3, C_H$ и C_h проводился факторный эксперимент типа 3^3 со скоростями $V = 10, 100, 220$ м/мин, подачами $S = 0,07, 0,11, 0,3$ мм/об и глубинами резания $t = 0,25, 0,5, 1,0$ мм.

В табл. 1, § 1 приведен план факторного эксперимента типа 3^3 , который применяется также в данном случае, для установления зависимостей (9).

Результаты экспериментальных данных приведены в табл. 7. Здесь приведены средние значения глубины упрочнения и микротвердости от 10 наблюдений каждого эксперимента, в зависимости от параметров V, S, t . Параметры V, S, t для каждой серии экспериментов оценены методом наименьших квадратов, путем минимизации суммы квадратов погрешностей разности $F(n)$.

$$F(n) = \sum_{u=1}^k \left[\theta_u - f(V, S, t) \right]^2 = \sum_{u=1}^k \left[\theta_u - f(n) \right]^2, \quad (10)$$

где K — число наблюдений.

Минимизация суммы квадратов погрешностей приводит к определенным количествам нормальных уравнений следующего вида:

$$\sum_{u=1}^k \left[\theta_u - f(k) \right] \left[\frac{\partial f(n)}{\partial n_i} \right]_n = 0, \quad i = 1, 2, \dots, p. \quad (11)$$

Затем эти нормальные уравнения решаются относительно n параметров, методом линеаризации этих уравнений.

Применяя условия Гаусса для (9) (как в § 1), после программирования на ЭВМ «Наири-2» можно получить все неизвестные коэффициенты и степени. В результате уравнения (9) можно представить в следующем окончательном виде:

Резец БРМ-1

$$h = \frac{60 S^{0.21} t^{0.059}}{V^{0.02}}; \quad H = \frac{274 S^{0.02} t^{0.031}}{V^{0.014}} \quad (12)$$

Резец обычный

$$h = \frac{164 S^{0.16} t^{0.062}}{V^{0.032}}; \quad H = \frac{310 S^{0.054} t^{0.036}}{V^{0.018}}. \quad (13)$$

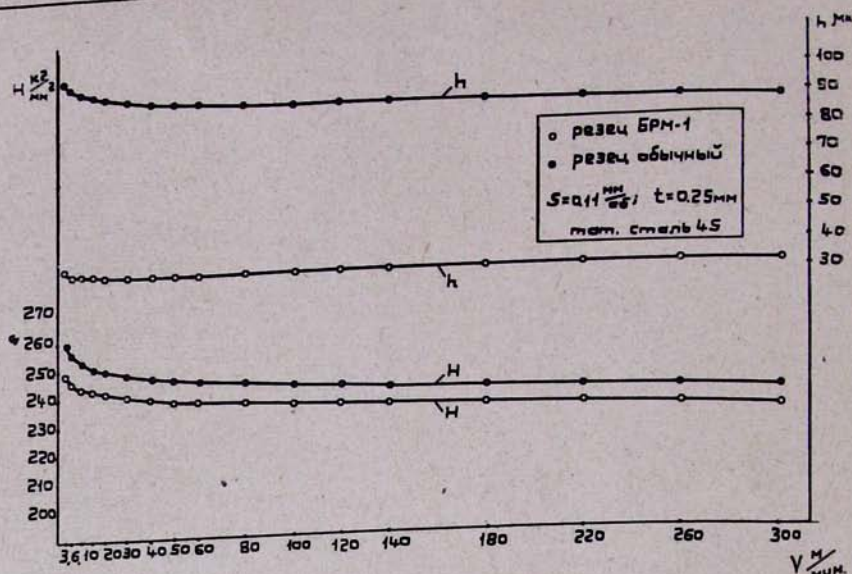


Рис. 4. Зависимость микротвердости и глубины упрочнения обработанной поверхности (H , h) от скорости резания (данные—расчетные).

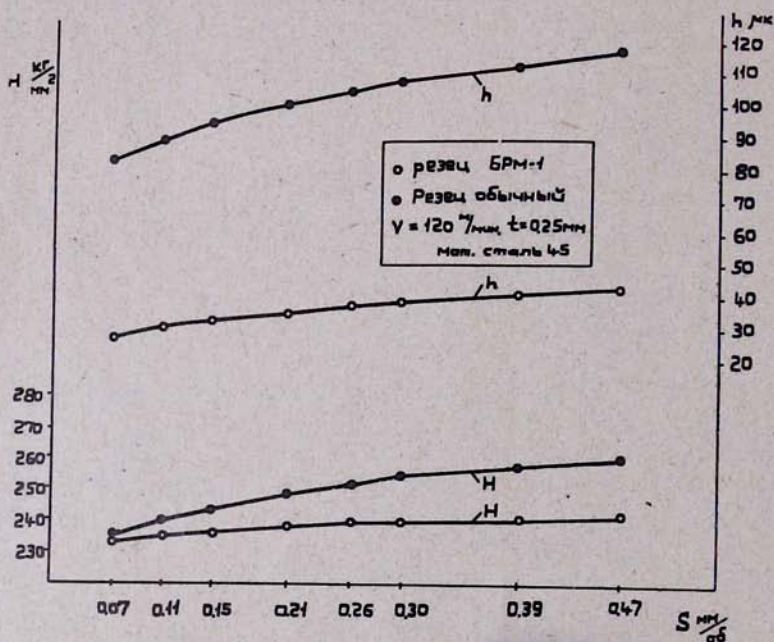


Рис. 5. Зависимость микротвердости и глубины упрочнения обработанной поверхности (H , h) от подачи (данные—расчетные).

На графиках (рис. 4, 5 и 6) приведены кривые, показывающие характер изменения микротвердости и глубины упрочнения поверхности в зависимости от параметров V , S и t . Как показывают кривые, с увели-

с увеличением скорости резания показатели упрочнения H и h , независимо от применяемого резца, непрерывно уменьшаются, причем наблюдается их сравнительно большее уменьшение в зоне возрастания скорости от 3 до примерно $V=80$ м/мин, чем в зоне увеличения скорости от 80 до 300 м/мин.

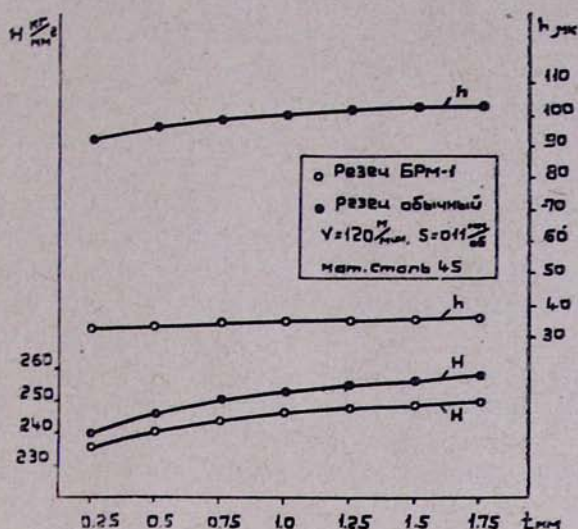


Рис. 6. Зависимость микротвердости и глубины упрочнения обработанной поверхности (H , h) от глубины резания (данные — расчетные).

Таблица 7

V , м/мин	S , мм/об	t , мм	Резец БРМ-1		Обычный резец	
			H , кг/мм ²	h , мкм	H , кг/мм ²	h , мкм
10	0,07	1,0	253	29	260	100
100	0,07	0,25	229	27	258	95
220	0,07	0,5	241	27	346	126
10	0,21	0,25	253	34	301	119
100	0,21	0,5	245	27	277	103
220	0,21	1,0	249	23	343	100
10	0,3	0,5	253	34	269	100
100	0,3	1,0	250	28	273	120
220	0,3	0,25	235	26	291	113

Это, на наш взгляд, объясняется следующим. С увеличением скорости резания до примерно $V=80$ м/мин коэффициент трения на соответствующих режущих поверхностях резца в значительной степени уменьшается, что установлено многочисленными исследованиями. При этом уменьшается также угол сдвига и, следовательно, силы резания. Одновременно возрастает количество выделяемого в предрезцовой и подрезцовой зонах тепла. В результате — снижение показателей упрочнения металла за линией среза.

Дальнейшее увеличение скорости приводит, с одной стороны, к еще большей степени возрастания тепла, а с другой, — к небольшому уменьшению коэффициента трения и значительному увеличению скорости деформации. Последнее вызывает уменьшение объема пластически деформированного металла. Однако увеличение скорости деформации, в свою очередь, сокращает продолжительность воздействия тепла на поверхностные слои, вследствие чего упрочнение металла в значительной степени сохраняется.

Следовательно, вышеуказанные противоположные факторы в конечном счете определяют незначительное уменьшение показателей упрочнения металла при больших значениях скорости резания.

Приведенные на рис. 5 и 6 данные показывают, что увеличение параметров среза вызывает значительное возрастание как микротвердости, так и глубины упрочнения обработанной поверхности. Это следует объяснить тем, что независимо от применяемого резца увеличение толщины и ширины среза приводит к возрастанию объема срезаемого слоя, вследствие чего увеличивается зона пластически деформированного металла перед передней поверхностью резца. В результате пластическая деформация в большей степени распространяется в глубь металла за линией среза, тем самым увеличивая показатели упрочнения поверхности.

Таблица 8

Резец БРМ-1				Резец обычный			
Источник изменчивости	число степ. своб.	сумма квад.	сред. квад.	источник изменчивости	число степ. своб.	сумма квадрат.	средний квадрат
Блок испытаний	2	14,6	7,3	Блок испытаний	2	290,5	145,75
Испыт. вариантов	2	12,6	6,3	Испыт. вариантов	2	141,8	70,59
Положение	2	78,0	39	Положение	2	284,2	142,1
Ошибка ε_{ijk}	2	8,8	4,4	Ошибка ε_{ijk}	2	66,977	33,485
Итого		104		Итого		783,4	
Блок испытаний	2	604,0	302,0	Блок испытаний	2	1026	813
Испыт. вариантов	2	298,0	149,0	Испыт. вариантов	2	3120	1560
Положение	2	308,6	154,3	Положение	2	5672	2836
Ошибка ε_{ijk}	2	264,6	132,3	Ошибка ε_{ijk}	2	1544	772
Итого		604		Итого		11962	

Особый интерес представляет сравнение данных микротвердости и глубины упрочнения при применении обычного и безвершинного резцов.

Как при изменении скорости резания, так и параметров среза микротвердость поверхности при обработке резцом БРМ-1 на несколько единиц меньше по сравнению с микротвердостью поверхности, образованной обычным резцом. А глубина упрочнения за линией среза уменьшает-

ся в среднем в 3,5 раза. Это обстоятельство делает весьма ценным применение резца БРМ-1, так как становится возможным получение деталей с минимальной глубиной дефектного поверхностного слоя, что, безусловно, имеет большое практическое значение.

Для установления физической сущности этого явления требуются дальнейшие исследования. Однако в первом приближении можно сказать, что резкое уменьшение глубины упрочнения поверхности при обработке резцом БРМ-1, по сравнению с обычным резцом, связано со значительным уменьшением удельного давления на контакте соприкосновения стружки и инструмента.

Для полной достоверности полученных формул производится проверка гипотезы влияния режимного поля на показатели упрочнения поверхности методом дисперсионного анализа.

Для этого значения h и H для БРМ-1 и обычного резца можно предварительно закодировать, вычитая из каждого показания соответственно: для БРМ-1 при h —28 и при H —245, а для обычного резца для h и H соответственно 108 и 290.

Расчеты дисперсионного анализа для каждого случая производятся способом, приведенным в § 1.

Результаты расчетов приведены в табл. 8, по ним можно проверить следующие гипотезы:

$$H_1: S = 0$$

$$\text{Резец БРМ-1} \quad F_{2,2} = \frac{7,3}{4,4} = 1,61$$

$$F_{2,2} = \frac{302}{132,3} = 2,28$$

$$\text{Резец обычный} \quad F_{2,2} = \frac{145,75}{33,485} = 4,3$$

$$F_{2,2} = \frac{813}{772} = 1,05$$

$$H_2: t = 0$$

$$\text{Резец БРМ-1} \quad F_{2,2} = \frac{6,3}{4,4} = 1,43$$

$$F_{2,2} = \frac{149}{132,3} = 1,13$$

$$\text{Резец обычный} \quad F_{2,2} = \frac{70,6}{33,488} = 2,1$$

$$F_{2,2} = \frac{1560}{772} = 2$$

$$H_3: V=0$$

$$\text{Резец БРМ-1} \quad F_{2,2} = \frac{39}{44} = 8,9$$

$$F_{2,2} = \frac{154,3}{132,3} = 1,1$$

$$\text{Резец обычный} \quad F_{2,2} = \frac{142,1}{33,488} = 4,2$$

$$F_{2,2} = \frac{2836}{772} = 3,67$$

Таблица 9

Скорость резания, м/мин	Резец БРМ-1						Резец обычный					
	H, расч. кг/мм ²	H, трад. кг/мм ²	H, °/о	h, расч. мк	h, трад. мк	h, °/о	H, расч. кг/мм ²	H, трад. кг/мм ²	H, °/о	h, расч. мк	h, трад. мк	h, °/о
3	248	245	+1,1	34,6	40	-5,7	259	258	0,3	102	110	-7,6
6	246	241	+2,1	34,2	33	10,8	256	271	-9,4	100	119	-16
10	244	234	+4,2	33,8	32	12	253	268	-5,5	98	110	-12
15	243	249	-2,6	33,6	35	-2,8	251	253	-0,6	97	96	0,8
20	242	238	+1,5	33,3	34	-2,4	250	247	1,2	96	110	12,7
30	240	233	+3,1	33,2	32	9	248	239	3,6	95	92	3
40	239	239	0	32,8	40	-12,7	247	242	2	94	95	-1
50	238	231	3	32,7	40	-13,5	246	241	2	93	96	-2,8
60	238	236	0,8	32,6	32	7,2	245	236	3,7	93	96	-3,2
80	237	236	0,3	32,4	40	-14,5	244	252	-3,1	92	80	13
100	236	234	0,8	32,3	40	-15	243	241	0,8	91	89	2,6
120	235	233	1,1	32,3	36	-6,1	242	258	-6,3	91	92	-1,1
140	235	233	0,8	32,0	40	-16	241	258	-6,4	91	114	-20
180	234	232	0,9	31,9	43	-22	240	258	-6,6	90	113	-20
220	234	234	-0,2	31,8	36	-8	239	241	-0,6	89	110	-19,1
260	233	236	-1,2	31,6	34	-2,9	239	247	-3,3	89	85	4,1
300	232	233	-0,3	31,5	32	2,7	238	241	-1,2	88	73	17
Среднее		1,7		10,4		3,1		9,6				
Под- ча мм/об												
0,07	233	237	-1,3	28,5	25	12	235	241	-3,7	84	91	7,6
0,11	235	241	-2,1	31,4	23	25	240	253	0	91	87	5,7
0,15	236	243	-2,9	33,2	31	9	243	261	-2,7	96	103	-7,0
0,21	238	245	-3,3	35,2	36	-4,2	248	263	-2,7	102	107	-5,2
0,26	239	247	-2,8	37,2	33	+4,9	251	264	-2,7	105	112	-8,3
0,30	239	245	-2,5	38,2	37	-6	254	250	3	108	116	-9,6
0,39	240	245	-2	40,2	38	-7,8	256	272	-4,8	112	111	-1,7
0,47	241	247	-2,6	42,1	38	9,3	259	273	4,5	116	119	-3,8
Среднее		-2,4		11,9		3		6,4				

Для подтверждения адекватности модели и доказательства эффективности запланированных экспериментов (как в § 1) были проведены также эксперименты традиционным методом, охватывающие условия резания, характерные для всей области допустимых операций (табл. 9).

Сравнение расчетных и наблюдаемых значений показывает, что модель хорошо описывает характер изменения микротвердости и глубины

упрочнения поверхности при резании безвершинным и обычными резцами.

Разность между наблюдаемыми и расчетными величинами составляет в среднем 3%, за исключением зоны больших скоростей, где несоответствие составляет примерно 20%.

§ 3. Определение температуры резания при точении резцом БРМ-1

Целью настоящего исследования является выведение уравнения для расчета температуры резания в зависимости от скорости резания, подачи и глубины резания (три независимые переменные), применяя статистический метод планирования экспериментов.

Как и при исследовании показателей упрочнения поверхности, здесь также не можем заранее установить функциональный вид уравнения, по которому можно рассчитать величину температуры резания при точении резцом БРМ-1. Однако на основании многочисленных опытов, проведенных разными авторами (обычными резцами), можно ожидать, что получающаяся в результате модель должна быть нелинейной.

Исследования проводились при точении резцом БРМ-1. Испытывались следующие материалы: сталь 45, дюраль Д16Т, бронза БРАЖ-9-4, латунь ЛС64-2, серый чугун СЧ2-40, медь М-2 (диаметр прутка — 10 мм).

Температура резания измерялась железо-константановой термопарой, расположенной на поверхности резца и заготовки. Сигнал температуры передавался от резца и заготовки к регистрирующему устройству ТЭП-0,9.

Математическая модель зависимости температуры резания от режимного поля имеет вид

$$\Theta = C_0 V^Z S^X t^Y \quad \text{в } m\varphi. \quad (14)$$

Для определения значений коэф. Z , X , Y и C_0 проводился факторный эксперимент типа 3^3 по плану, приведенному в параграфе 1. Результаты исследований приведены в табл. 10. Здесь представлены средние значения температуры резания в милливольтках от трех наблюдений каждого эксперимента, в зависимости от V , S , t .

Величины V , S и t для каждой серии экспериментов оценены методом наименьших квадратов (§ 2). Все неизвестные коэффициенты и степени, входящие в уравнение (14), определяются по методике, описанной в § 1. После этого уравнения (14) можно представить в окончательном виде:

$$\text{Сталь 45} - \Theta_1 = 1,76 V^{0,49} S^{0,29} t^{0,11}$$

$$\text{Д16Т} - \Theta_2 = 0,30 V^{0,72} S^{0,45} t^{0,12}$$

$$\text{Браж-9-4} - \Theta_3 = 0,47 V^{0,7} S^{0,37} t^{0,14}$$

$$\begin{aligned} \text{ЛС64-2} & - \theta_4 = 0,43 \quad V^{0,6} S^{0,31} t^{0,13} \\ \text{СЧ21-40} & - \theta_5 = 0,78 \quad V^{0,55} S^{0,31} t^{0,15} \\ \text{Медь М-2} & - \theta_6 = 0,39 \quad V^{0,65} S^{0,43} t^{0,17} \end{aligned}$$

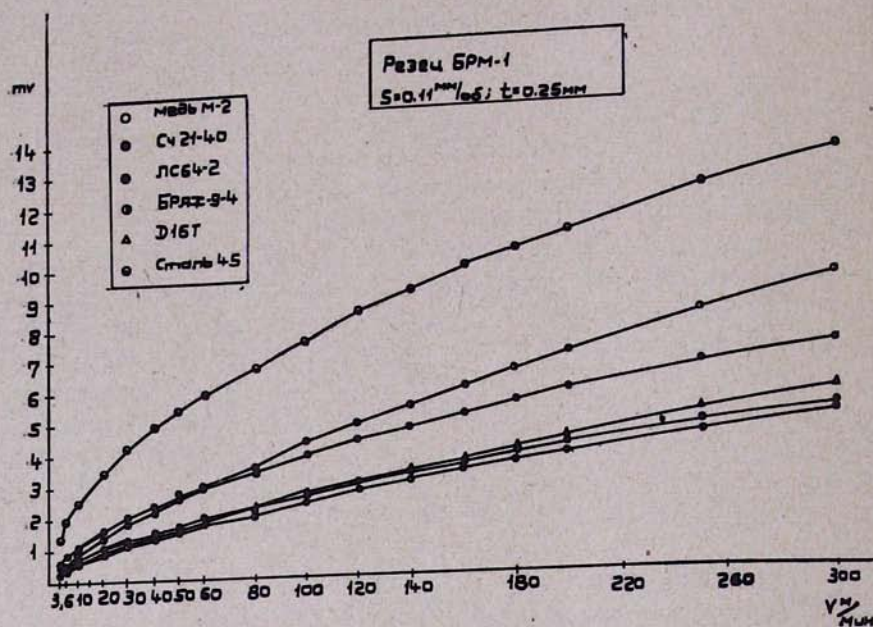


Рис. 7. Зависимость температуры резания от скорости резания (данные—расчетные).

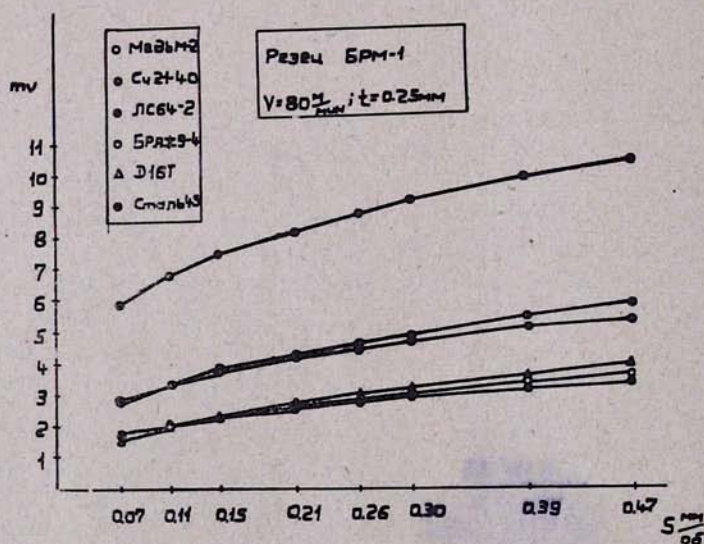


Рис. 8. Зависимость температуры резания от подачи (данные—расчетные).

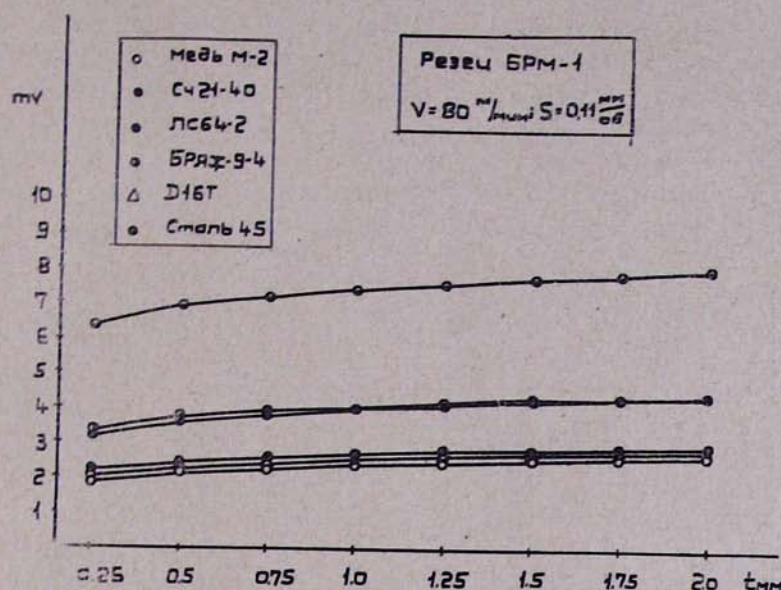


Рис. 9. Зависимость температуры резания от глубины резания (данные — расчетные).

На графиках (рис. 7, 8, 9) приведены кривые изменения температуры резания θ от V , S и t .

Из этих графиков следует, что с увеличением скорости резания температура возрастает, причем рост ее происходит медленнее, чем рост скорости резания. Это, видимо, связано с тем, что, с одной стороны, с увеличением скорости резания уменьшается количество тепла, выделяющегося за счет пластической деформации, а с другой стороны, увеличивается количество тепла, выделяемого за счет работы трения.

При обработке пластичных металлов температура передней поверхности БРМ-1 выше температуры задней поверхности. Это объясняется тем, что передняя поверхность нагревается вследствие трения и теплопередачи от нагретой стружки, а задняя — лишь в результате трения.

При обработке хрупких металлов, когда образуется стружка надломом, касание ее с передней поверхностью прерывистое, и резец нагревается в основном за счет трения по задней поверхности. В этом случае можно полагать, что температура задней поверхности будет выше температуры передней. Поэтому температура резания выше у СЧ21-40, БРЖ-9-4, чем при обработке ЛС64-2 или Д16Т.

Температура резания повышается непропорционально глубине резания и подачи. Это объясняется нижеследующими причинами. С увеличением t увеличивается работа резания, следовательно, и количество тепла, но одновременно с этим увеличивается рабочая длина лезвия, что улучшает теплоотвод.

С увеличением S , с одной стороны, возрастает давление стружки на

резец, следовательно, увеличивается работа деформации и количество тепла, а с другой стороны, увеличивается площадь контакта стружки с передней поверхностью. Таким образом, первый фактор (давление) способствует повышению температуры, а второй фактор (площадь контакта) — уменьшению температуры. Следует отметить также, что, поскольку первый фактор несколько превалирует над вторым, то подача в большей степени влияет на температуру резания, чем глубина резания. С другой стороны, это объясняется тем, что с увеличением глубины резания теплоотвод лучше, чем при увеличении подачи S .

Таблица 10

№ эксперимента	$V, \text{м/мин}$	$S, \text{мм/об}$	$t, \text{мм}$	Сталь 45 θ_1	Д16Т θ_2	БРАЖ 9—4 θ_3	ЛС64-2 θ_4	СЧ21-40 θ_5	Медь М2 θ_6
1	10	0,07	1,0	2,3	0,15	0,9	0,75	1,4	0,3
2	100	0,07	0,25	6,5	0,9	3,7	2,3	4,0	1,2
3	220	0,07	0,5	12,5	1,85	6,9	3,8	11,1	2,0
4	10	0,21	0,25	2,7	0,23	0,87	1,0	1,5	0,38
5	100	0,21	0,5	9,5	1,7	6,0	3,5	6,2	2,1
6	220	0,21	1,0	13,1	2,9	8,8	5,54	12,3	3,6
7	10	0,3	0,5	3,4	0,38	1,1	1,4	1,87	0,55
8	100	0,3	1,0	11,0	2,1	6,7	4,0	8,0	2,7
9	220	0,3	0,25	12,1	2,7	7,8	5,35	10,6	3,2

Из анализа графиков можно сделать также следующий вывод: из режимов резания наибольшее влияние на температуру резания оказывает скорость резания, несколько меньше — подача, а самое меньшее влияние оказывает глубина резания.

Интерес представляет также то обстоятельство, что при обработке черных металлов температура резания получается в несколько раз больше, чем при обработке цветных металлов. Это можно объяснить различной теплопроводностью указанных материалов. Чем меньше теплопроводность обрабатываемого материала, тем больше температура резания, и наоборот. К тому же, если теплопроводность резца ниже теплопроводности обрабатываемого материала, то получается высокая температура резания.

По-видимому, этим следует объяснить получение более высокой температуры резания при обработке сталей и чугунов, чем при обработке цветных материалов.

Для полной достоверности полученных графиков и формул производится проверка гипотезы влияния режимов резания на температуру резания методом дисперсионного анализа (подробно см. в § 1).

С этой целью значения температуры θ для всех материалов можно предварительно закодировать, вычитая из каждого показания соответственно:

Для стали 45	— 8,1	Для ЛС64-2	— 3,1
Для Д16Т	— 1,4	Для СЧ21-40	— 6,3
Для БРАЖ-9-4	— 4,75	Для меди М-2	— 1,8

п (при этом значение F статистики не меняется).

Расчеты дисперсионного анализа для каждого материала производятся, как показано в параграфе 1.

Результаты расчетов дисперсионного анализа с полноблочным планированием латинского квадрата приведены в табл. 11.

По полученным результатам можно проверить следующие три гипотезы:

$$H_1: S = 0$$

$$\text{Сталь 45} \quad F_{2,2} = \frac{0.83}{0.65} = 1.27$$

$$\text{Д16} \quad F_{2,2} = \frac{0.5}{0.025} = 20$$

$$\text{БРАЖ-9-4} \quad F_{2,2} = \frac{1.86}{0.255} = 7.3$$

$$\text{ЛС64-2} \quad F_{2,2} = \frac{1.44}{0.115} = 12.5$$

$$\text{СЧ21-40} \quad F_{2,2} = \frac{1.6}{0.6} = 2.7$$

$$\text{Медь М-2} \quad F_{2,2} = \frac{0.87}{0.05} = 17.4$$

Гипотеза отвергается, так как $F_{2,2} < F_{\text{табл.}}$. Однако необходимо отметить, что влияние подачи на температуру резания неодинаково при обработке вышеуказанных материалов. Большое влияние подачи на температуру резания намечается при обработке Д16Т, М-2, ЛС64-2 и частично БРАЖ-9-4.

$$H_2: t = 0$$

$$\text{Сталь 45} \quad F_{2,2} = \frac{0.795}{0.65} = 1.22$$

$$\text{Д16Т} \quad F_{2,2} = \frac{0.18}{0.025} = 7.2$$

$$\text{БРАЖ-9-4} \quad F_{2,2} = \frac{1.36}{0.255} = 5.3$$

$$\text{ЛС64-2} \quad F_{2,2} = \frac{0.295}{0.115} = 2.6$$

$$\text{СЧ21-40} \quad F_{2,2} = \frac{2.62}{0.6} = 4.4$$

$$\text{Медь М-2} \quad F_{2,2} = \frac{0.395}{0.05} = 7.9$$

Сталь 45				Д16Т			
Источник изменчивости	число степеней свободы	сумма квадратов	средний квадрат	источник изменчивости	число степеней свободы	сумма квадратов	средний квадрат
Блок испытаний	2	1,66	0,83	Блок испытаний	2	1	0,5
Испыт. вариантов	2	1,59	0,795	Испыт. вариантов	2	0,36	0,18
Положение	2	154,5	77,25	Положение	2	7,56	3,78
Ошибка ε_{ijk}	2	1,3	0,65	Ошибка ε_{ijk}	2	0,05	0,025
Итого	8	159,05		Итого	8	8,97	
БРАЖ-9-4				ЛС64-2			
Блок испытаний	2	3,72	1,86	Блок испытаний	2	2,88	1,44
Испыт. вариантов	2	2,73	1,36	Испыт. вариантов	2	0,59	0,295
Положение	2	74,05	37,025	Положение	2	22,3	11,15
Ошибка ε_{ijk}	2	0,51	0,255	Ошибка ε_{ijk}	2	0,23	0,115
Итого	3	81,01		Итого	8	24,0	
СЧ21-40				М-2			
Блок испытаний	2	3,2	1,6	Блок испытаний	2	1,73	0,87
Испыт. вариантов	2	5,23	2,62	Испыт. вариантов	2	0,79	0,395
Положение	2	142,4	71,2	Положение	2	9,73	4,87
Ошибка ε_{ijk}	2	1,2	0,6	Ошибка ε_{ijk}	2	0,1	0,05
Итого	8	152,03		Итого	8	12,35	

Гипотеза снова отвергается. Можно отметить, что при обработке цветных металлов, как М-2, Д16Т, БРАЖ-9-4, а также СЧ21-40, глубина резания в большей степени влияет на температуру резания, чем при обработке стали 45.

$$H_3: V = 0$$

$$\text{Сталь 45 } F_{2,2} = \frac{77,25}{0,65} = 118,8$$

$$\text{Д16Т } F_{2,2} = \frac{3,78}{0,025} = 151,2$$

$$\text{БРАЖ-9-4 } F_{2,2} = \frac{37,025}{0,255} = 146$$

$$\text{ЛС64-2 } F_{2,2} = \frac{11,15}{0,115} = 97$$

$$\text{СЧ21-40 } F_{2,2} = \frac{71,2}{0,60} = 118,6$$

$$\text{Медь М-2 } F_{2,2} = \frac{4,87}{0,05} = 74$$

Таблица 12

Таблица 12

Неизменные параметры	Переменные параметры	Температура в шв												
		сталь 45			Д 16 Т			Латунь ЛС64			СЧ 31-40			
		град.	стат.	°/о	град.	стат.	°/о	град.	стат.	°/о	град.	стат.	°/о	
$S=0,11$ мм/об $t=0,25$ мм	Скорость резания, V м/мин	3	1,4	1,4	0	0,2	0,2	0	0,3	0,3	0	0,5	0,6	-12,6
	10	2,8	2,5	10,7	0,5	0,5	1	0,6	0,6	0	1,0	1,1	-10,0	
	30	4,9	4,0	12,9	1,0	1,1	-7	1,3	1,3	0	1,9	2,0	-8	
	50	5,8	5,5	6	1,5	1,6	8,3	1,7	1,7	0	2,3	2,7	-14,6	
	80	7,0	6,6	5,2	1,8	2,0	-7,5	2,3	2,2	5,2	2,8	3,2	-11	
	120	8,4	8,4	0	3,0	3,0	0	2,8	2,9	-3,7	4	4,3	-8,1	
	160	9,9	9,7	-2	3,7	3,6	3,2	3,5	3,5	0	4,9	5,1	-3,8	
	200	10,4	10,7	-2,8	4,3	4,3	-1	3,9	4,0	2,5	5,4	5,7	-6,6	
	300	11,5	13,0	-12,2	5,8	5,7	1,5	4,8	5,1	5,8	6,8	7,1	-3,5	
$V=80$ м/мин $t=0,25$ мм	Подача S мм/об	0,07	5,8	5,8	-0,7	1,5	1,6	-5	1,7	1,9	-8,8	2,5	2,8	-12,4
	0,11	6,7	6,7	-0,7	1,7	2,0	-12	2,0	2,2	-6,8	2,9	3,2	-10	
	0,15	7,2	7,4	-2,7	2,0	2,3	-13	2,3	2,5	-6	3,4	3,6	-7	
	0,21	7,9	8	-1,2	2,5	2,7	-5,6	2,7	2,8	-4,6	3,9	3,9	0	
	0,26	8,4	8,6	-2,3	2,8	3,0	-5,0	2,9	3	-3,3	4,1	4,2	-2,8	
	0,30	8,8	8,9	-1,1	3,0	3,1	-5,8	3,2	3,2	0	4,3	4,4	-2,7	
	0,39	9,6	9,7	-1	3,2	3,5	-7,5	3,6	3,5	2,8	4,8	4,8	0	
	0,47	10,1	10,0	-0,9	3,7	3,9	-3,9	3,1	3,8	3,8	5,1	5,1	0	
$V=80$ м/мин $S=0,11$ мм/об	Глубина резания, t мм	0,25	7,6	6,4	16	1,7	2,0	-14	2,2	2,3	-4	3,2	3,2	-0,9
	0,5	8,2	6,9	15	1,9	2,2	-12	2,3	2,5	-4,9	3,3	3,6	-7,8	
	0,75	8,4	7,2	13,7	2,0	2,3	-12,6	2,5	2,6	-3,5	3,3	3,8	-12	
	1,0	8,6	7,5	13,6	2,0	2,4	-13,5	2,7	2,7	0	3,9	4,0	-3,2	
	1,25	8,7	7,6	12,5	2,1	2,4	-13,2	2,7	2,7	0	3,9	4,1	-4,4	
	1,50	8,8	7,8	11,4	2,2	2,5	-12	2,8	2,8	0	4,1	4,2	-3	
	1,75	8,9	7,9	11	2,4	2,5	-5,1	2,8	2,9	-3,1	4,2	4,3	-1,8	
	2,00	9,2	8,1	11,5	2,5	2,6	-2,7	2,9	2,9	0	4,3	4,4	-1,5	

Гипотеза отвергается, так как влияние скорости резания на температуру резания при обработке этих материалов не вызывает сомнения.

Для подтверждения адекватности модели и для доказательства эффективности по проведению запланированных экспериментов было проведено еще несколько экспериментов по традиционному методу, охватывающему условия резания, характерные для всей области допустимых операций (табл. 12).

Сравнение расчетных и наблюдаемых значений температуры резания показывает, что принятая модель хорошо описывает характер изменения температуры резания при обработке резцом БРМ-1. В табл. 12 приведены некоторые характерные значения наблюдаемого и расчетного значений температуры резания (разность составляет 5%, за исключением области больших значений скорости резания, где несовпадение достигает 12%). Это сравнительно высокое значение расхождения обусловлено тем, что в запланированных опытах для оценки параметров шаг на уровнях был значительно больше. Последнее обстоятельство и привело к плохой оценке в указанной области изменения скорости резания.

Исходя из сказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Для некоторой характерной комбинации БРМ-1 с обрабатываемыми материалами получены уравнения расчета сил резания, показателей упрочнения обработанной поверхности и температуры резания в функции от параметров V , S , t , в качестве независимых переменных. Предполагается, что функциональный вид уравнения будет справедлив и для других комбинаций «резец—обрабатываемый материал», за исключением тех комбинаций, где значения параметров могут быть различными.

2. Для построения предварительной модели и указания необходимых изменений используется факторный расчет и дисперсионный анализ. Для оценки параметров используется линейный метод наименьших квадратов. Адекватность модели проверяется анализом дисперсий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Минасян, Безвершинный резец БРМ-1, «Машиностроитель», № 6, 1966.
2. Г. С. Минасян, О некоторых преимуществах безвершинного резца БРМ-1, «Известия АН Арм. ССР», сер. Т. Н., т. XIX, № 3, 1966.
3. Г. С. Минасян, Определение углов установки при заточке безвершинного резца БРМ-1, «Машиностроитель», № 11, 1967.
4. Г. С. Минасян, Шероховатость поверхности при точении безвершинным резцом БРМ-1, «Известия АН Арм. ССР», сер. Т. Н., т. XXIII, № 4, 1970.
5. Г. С. Минасян, Геометрические параметры и углы безвершинного резца БРМ-1 в процессе резания, «Физика резания металлов», вып. 1, Издательство АН Арм. ССР, Ереван, 1971.
6. М. В. Касьян, Г. С. Минасян, Г. Б. Багдасарян, Построение математической модели для расчета составляющих силы резания при точении безвершинным и обычным резцами, «Промышленность Армении», № 1, 1971.
7. Ч. Хикс, Основные принципы планирования эксперимента, Изд-во «Мир», 1967.
8. E. S. Pearson, H. O. Hartly, Biometrika Tables for statisticians. Vol. I, New York, Cambridge, 1958.