

Ю. Г. КАРАПЕТАН

СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Широкое внедрение торцевого фрезерования и возросшие в связи с этим требования к металлорежущим станкам вызывают необходимость изучить закономерности, по которым изменяются составляющие сил резания в зависимости от параметров режима резания, геометрии режущей части инструмента и ряда других факторов. В процессе фрезерования торцевая фреза по всей дуге контакта с обрабатываемым материалом подвергается воздействию мгновенных переменных нагрузок, вследствие чего по длине режущей кромки образуются высокие контактные напряжения, выкрашивания и сколы. Кроме того, процессу торцевого фрезерования свойственны врезание и выход инструмента, переменная толщина среза, попутное и встречное фрезерование за один цикл работы.

Целью настоящей работы является исследование зависимости сил резания при торцевом фрезеровании от режимов резания.

Исследование проводилось на вертикально-фрезерном станке «Чепель». Фрезеровали заготовки в виде брусков из стали 45, ст. 1Х18Н9Т и титанового сплава ВТ14, шириной $t=80$ мм в состоянии поставки. В качестве инструмента использовалась торцевая однозубая фреза диаметром $D=110$, оснащенная твердосплавными пластинками марки Т5К10 и ВК8 со следующей геометрией заточки: $\gamma=0^\circ$, $\alpha=12^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\varphi=15^\circ$ и $\alpha=10^\circ$.

Рассматривался случай неполного симметричного фрезерования ($t/D=0,72$).

Для измерения величины сил резания применялась методика одновременного определения крутящего момента и составляющих сил резания при торцевом фрезеровании [1].

Динамометрическая аппаратура для исследования силовых зависимостей состоит из следующих основных узлов: 1) трехкомпонентного динамометрического стола и моментомера, 2) блока питания, стабилизатора и восьмиканального тензометрического усилителя марки 8АН4-7М, 3) двенадцатиканального шлейфового осциллографа марки Н105.

В процессе резания регистрация сил производилась на фотобумаге с помощью осциллографа. На рис. 1 для примера приведена осциллограмма, полученная при обработке ст. 45, где хорошо видны кривые изменения составляющих сил резания за один оборот фрезы.

Переход от осциллограммы к действительным значениям измерительных усилий производился с помощью тарировочных графиков. Оба

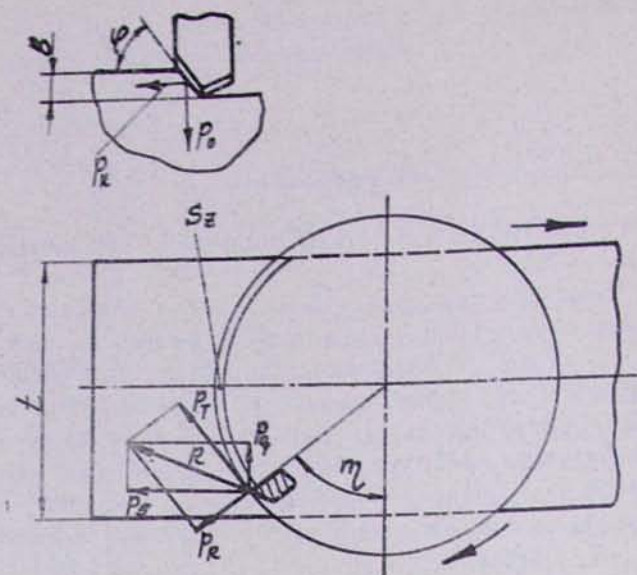


Рис. 1. Схема составляющих силы резания при торцевом фрезеровании.

динамометра тариговались на специальных стендах с помощью контрольных динамометров кольцевого типа. Тарировка производилась до начала измерения и после окончания каждой серии опытов. Тарировочная характеристика прибора линейная, нулевые показания при нагрузке и разгрузке стабильные. Взаимное влияние составляющих сил резания не превышает 4%.

В практике проверка инструмента, узлов станка и приспособления на прочность производится исходя из максимальных сил резания.

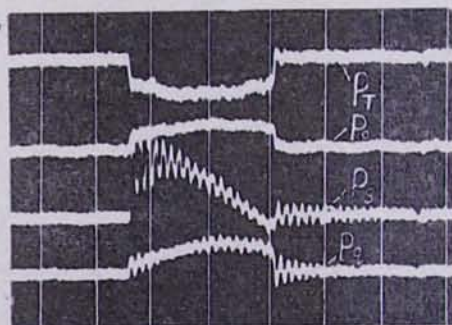


Рис. 2. Осциллограмма составляющих сил резания при обработке ст. 45 ($V=81$ м/мин, $S_z=0,2$ мм/зуб, $B=2$ мм).

Из рис. 2 видно, что при данной выбранной схеме фрезерования эти силы достигают своего максимума в плоскости симметрии, где $\alpha_{\varphi=90^\circ} =$

$a_{\max} = s_z \sin \varphi$ и $P_{R\max}$ совпадает с P_S . Таким образом, по осциллограмме определяются все искомые значения сил резания: $P_{T\max}$, $P_{R\max}$ и $P_{O\max}$. Для выведения уравнения сил резания в зависимости от параметров режимов резания применяется статистический метод планирования эксперимента [2]. Как и при исследовании температуры контакта в процессе фрезерования, так и здесь нельзя заранее установить функциональный вид уравнения, по которому можно рассчитать величины сил резания при торцевом фрезеровании. Однако на основании многочисленных опытов, проведенных разными авторами, можно предполагать, что полученная математическая модель должна быть нелинейной и иметь такой вид:

$$P_{T\max} = C_{PT} \cdot B^{X_T} \cdot S_z^{Y_T} \cdot V^{-Z_T}, \quad (1)$$

$$P_{R\max} = C_{PR} \cdot B^{X_R} \cdot S_z^{Y_R} \cdot V^{-Z_R}, \quad (2)$$

$$P_{O\max} = C_{PO} \cdot B^{X_O} \cdot S_z^{Y_O} \cdot V^{-Z_O} \quad (3)$$

Для определения значения коэффициентов и показателей, входящих в уравнения (1), (2), (3), проводился факторный эксперимент типа 3^3 по плану, изложенному в работе [2].

Величины V , S_z и B для каждой серии экспериментов оценены методом наименьших квадратов. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ экс	V , м/мин	S_z , мм/зуб	B , мм	$P_{T\max}$, кг	$P_{R\max}$, кг	$P_{O\max}$, кг
1	32	0,1	1,5	39	12	23
2	81	0,1	1,5	13	4	8
3	207	0,1	3,5	74	18	39
4	32	0,2	0,5	24	7	13
5	81	0,2	3,5	135	33	70
6	207	0,2	1,5	57	13	30
7	32	0,4	3,5	244	61	127
8	81	0,4	1,5	103	25	54
9	207	0,4	0,5	34	8	18

Применяя условия Гауса для (1), (2), (3) и программируя на ЭВМ «Напри-2», можно получить все неизвестные коэффициенты и показатели степеней (табл. 2).

На рис. 3 и 4 приведены графики зависимости составляющих сил резания от элементов режимного поля.

Как известно, работа резания затрачивается, в основном, на пластическую и упругую деформацию, на трение инструмента со стружкой и деталью. В процессе стружкообразования силы резания будут тем больше, чем пластичнее материал и чем больше его способность к упрочнению.

Обрабатываемый материал	Составляющая силы резания											
	тангенциальная				радиальная				осевая			
	C_{PT}	X_T	Y_T	Z_T	C_{PR}	X_R	Y_R	Z_R	C_{P_0}	X_0	Y_0	Z_0
Сталь 45	200	0,93	0,73	-0,08	71	0,85	0,65	-0,18	116	0,89	0,7	-0,11
IX18H9T	210	0,98	0,8	-0,03	80	0,85	0,67	-0,1	120	0,9	0,74	-0,06
BT14	178	0,9	0,7	-0,1	89	0,8	0,63	-0,2	115	0,85	0,67	-0,15

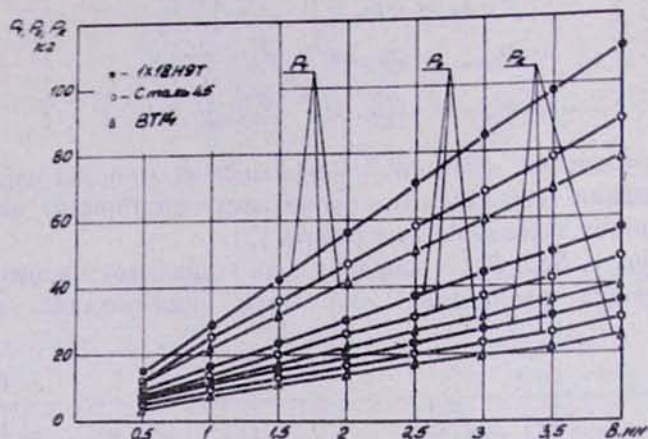


Рис. 3. Влияние глубины резания на составляющие сил резания для ст. 45, ст. IX18H9T и BT14 ($V=101$ м/мин, $S_z=0,1$ мм/зуб).

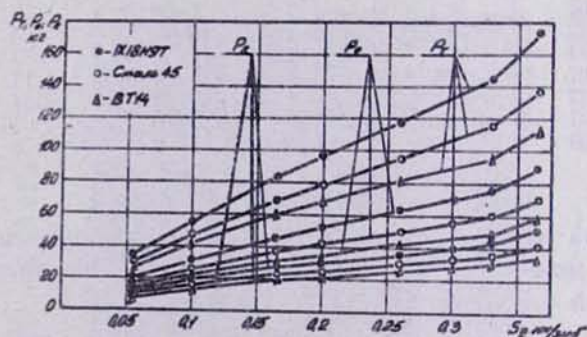


Рис. 4. Влияние подачи на составляющие сил резания для ст. 45, ст. IX18H9T и BT14 ($V=101$ м/мм, $B=2$ мм).

Как видно из рис. 3, силы резания возрастают с увеличением ширины среза, причём $P_{0\max}$ находится в прямопропорциональной зависимости, $P_{R\max}$ и $P_{0\max}$ — в степени меньшей (табл. 2), а коэффициент трения и удельные нагрузки остаются постоянными, при больших соот-

ношениях ширины среза к его толщине ($b/a_{\max} > 1$) [3]. Следовательно, ширина среза имеет наименьшее влияние на процесс стружкообразования, и если ширина среза по величине приближается к его толщине, то ее влияние на процесс стружкообразования становится сравнимым с влиянием толщины среза (рис. 4).

С увеличением толщины среза (рис. 3) силы резания не возрастают пропорционально, как это было при увеличении ширины среза, а вследствие этого повышается удельное давление передней поверхности инструмента, удельные касательные давления остаются почти без изменения, усадка стружки уменьшается. Следовательно, толщина среза больше влияет на процесс стружкообразования, чем его ширина.

Скорость резания имеет наименьшее влияние на величину сил резания (табл. 1), но является одним из основных факторов, влияющих на процесс стружкообразования [3].

Сопоставление величины сил резания (рис. 2, 3), для разных материалов, при одних и тех же условиях резания, показывает, что они находятся на разных уровнях.

Из табл. 3 видно, что ВТ14 имеет более высокие механические показатели, чем ст. IX18Н9Т или ст. 45, но составляющие силы резания у ВТ14 меньше, чем у ст. 45.

Таблица 3

Обрабатываемый материал	$\sigma_B, \text{кг/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кг/мм}^2$	$\delta^0/\%$	$\frac{\delta}{\sigma_B}$	$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B}$	H_B	$\lambda, \frac{\text{кал}}{\text{см.сек}^\circ\text{C}}$
ВТ 14	95—105	65—75	14—16	0,14	0,7	340	0,014
IX18Н9Т	50—60	23—27	40—42	0,7	0,48	160	0,04
Ст. 45	60—65	35	16	0,4	0,5	180	0,13

При обработке титанового сплава ВТ14 образуется резко выраженная элементная стружка с усадкой $\xi = 0,85 \div 1,4$. Этому содействуют опережающие трещины, образующиеся в связи с пониженным модулем упругости и сдвига. Кроме того, при повышении температуры контакта титановые сплавы энергично поглощают азот и кислород из воздуха, что приводит к охрупчиванию, понижению пластичности. Далее из табл. 3 следует, что ст. IX18Н9Т по своим механическим показателям близка к ст. 45, но так как аустенитные стали при резании очень склонны к наклепу, то уже сравнительно небольшая деформация вызывает значительные повышения твердости, следовательно, давление стружки на инструмент увеличивается и потому силы резания достигают значительных величин.

Из вышеизложенного следует, что на величину сил резания, кроме параметров режимов резания, немаловажное влияние оказывают и физико-механические свойства обрабатываемых материалов.

Для полного анализа полученных графиков и формул производится проверка гипотезы влияния параметров режимов резания на силы резания методом дисперсионного анализа. Для $P_{T\max}$ при обработке ст. 45, предварительно закодированном, вычитываем из каждого показания 80° (при этом значение F статистики не меняется).

Таблица 4

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат
Блок испытаний	2	11150	5575
Испытание вариантов	2	25202	12601
Положение	2	3410	1705
Ошибка	2	2638	1319
Итого	8	42400	

По данным табл. 4 проверяем три следующие гипотезы:
 $H_1: B=0$ (нет влияния глубины резания),

$$F_{2,2} = \frac{12601}{1319} = 9,55;$$

$H_2: S_z=0$ (нет влияния подачи),

$$F_{2,2} = \frac{5575}{1319} = 4,23;$$

$H_3: V=0$ (нет влияния скорости резания),

$$F_{2,2} = \frac{1705}{1319} = 1,29.$$

Из приведенных гипотез не отвергается только $H_3: V$, так как $F_{2,2} < F_{\text{табл.}}$.

Остальные две гипотезы отвергаются при 5%-ном уровне значимости.

Для полной достоверности полученных формул и графиков было проведено также несколько экспериментов традиционным методом (результаты здесь не приводятся).

Выводы

1. Для ст. 45, ст. IX19H9T и титанового сплава BT14 при торцевом фрезеровании получены уравнения расчета максимальных составляющих сил резания в зависимости от параметров режимов резания.

2. Для полного анализа полученных формул и графиков производится дисперсионный анализ.

При фрезеровании титанового сплава BT14, имеющего высокий предел прочности, текучести и твердости относительно ст. 45 и ст.

ТТХ18Н9Т, при одинаковых условиях резания можно было бы ожидать величину силы резания больше, чем у ст. 45 или ст. IX18Н9Т, но благодаря склонности титанового сплава к охрупчиванию, незначительному упрочнению и усадке стружки (даже отрицательной), силы резания получаются меньше, чем у сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Минасян, М. Г. Фаградян, Ю. Г. Карапетян. Методика одновременного определения крутящих моментов и составляющих сил резания при торцевом фрезеровании. «Воздействие режущего инструмента на физические свойства металлов», вып. III, Ереван, 1973.
2. Ч. Хикс. Основные принципы планирования экспериментов. М., «Мир», 1967.
3. Н. Н. Зорев. Вопросы механики процесса резания металлов. М., 1956.