

*P. J. Z. Estrup, J. A. Meyer // Rev. Sci. Instrum. – 1991. - №62(5). – P. 1326-1332.* 9. *Rossi F. Contact potential measurement: Spacing dependent errors / F. Rossi // Rev. Sci. Instrum. – 1992. - №63(9). – P. 4174-4181.* 10. *Де Бур* Анализ и усовершенствование метода Кельвина для измерения разностей работ выхода / *Де Бур, Круземейер, Яснерс // Приборы для научных исследований. – 1979. - №8. – С. 74-81.* 11. *D'Arcy R. J. The effects of stray capacitance on the Kelvin method for measuring contact potential difference. / R. J. D'Arcy, N. A. Surplice.// J. Phys. D: Appl. Phys. – 1970. – №3. – P. 482-488.* 12. *Коротких В. Л.* Манипулятор для измерения контактной разности потенциалов методом Кельвина / *В. Л. Коротких, А. Д. Коринфский, А. Л. Мусатов // Приборы и техника эксперимента. – 1977. - №2. – С. 211-212.* 13. *Jacobs H. O. Resolution and contrast in Kelvin probe force microscopy / H. O. Jacobs, P. Leuchtmann, O. J. Homan, A. Stemmer // Journal of applied physics. – 1998. – V. 84, №3. – P. 1168-1173.* 14. *Rosenwaks Y. Kelvin probe force microscopy of semiconductor surface defects / Y. Rosenwaks, R. Shikler // Physical Review. – 2004. – В70, №085320 – P. 1-6.* 15. *Soonckind L. Sur l'utilisation de la methode de Kekvin pour l'etude des travaux de sortie des surfaces inhomogenes / L. Soonckind, J. Bonnet, L. Lassabatere // Revue de physique appliquée. – 1979. – V. 14, №8. – P. 795-798.*

*Поступила в редколлегию 01.10.2010*

**УДК 621.993.2**

**О. Л. КОНДРАТЮК**, канд. техн. наук, доц., г. Харьков

**Ю. И. СЫЧОВ**, канд. техн. наук, доц., г. Харьков

**А. О. СКОРКИН**, асс., г. Харьков, Украина.

## **О РАСЧЕТЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРИ НАРЕЗАНИИ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКАМИ**

У даній роботі приводиться узагальнений висновок, придатний для розрахунку сил, що діють при нарізанні різьби мітчиками з різною геометрією.

В данной работе приводится обобщенный вывод, пригодный для расчета сил, действующих при резьбонарезании метчиками с различной геометрией.

### **Постановка задачи.**

Одной из актуальных проблем на сегодняшний день в области обработки металлов является процесс нарезания резьбы метчиками. Сложность процесса обусловлена сложными процессами в зоне резания.

Обычно при анализе сил резания метчиками крутящий момент выражается формулами, полученными на основании частных зависимостей для определенных марок сталей. Эти данные являются разрозненными, и требуют дальнейшего изучения.

### **Основная часть**

Метчики в основном испытывают деформацию кручения, поэтому задача сводится к нахождению количественной оценки крутящего момента от параметров обработки. Для нахождения вышеупомянутой зависимости исходили из физико-механической природы сил резания, которые разделили на две группы:

1. силы, действующие на передней поверхности, обусловленные процессом образования стружки;
2. силы, действующие на задней поверхности, обусловленные контактом инструмента с заготовкой по поверхности резания.

В соответствии с этим крутящий момент может быть представлен суммой

$$M = M_{\text{п}} + M_{\text{з}}$$

где  $M_{\text{п}}$  и  $M_{\text{з}}$  – крутящие моменты, создаваемые силами, приложенными соответственно на передней и задней поверхностях инструмента.

Для расчета первого слагаемого –  $M_n$  основывались на представлении процесса резания как деформации простого сдвига вдоль единственной плоскости сдвига (I). С целью использования приведенных для расчета сил, действующих при косоугольном резании нами проводились экспериментальные исследования процесса стружкообразования с помощью корней стружек и направления схода стружки. Эти исследования показали, что угол схода стружки при резбонарезании метчиками с винтовыми канавками приблизительно равен углу наклона канавок –  $\omega$ . В дальнейшем принимали эти углы равными.

Спроектировав силы, действующие по передней поверхности зубьев метчика, на направление скорости резания и умножив на плечо, получили следующие выражения для крутящего момента

$$M_n = \tau \cdot F \cdot l \cdot k,$$

Где  $\tau$  - среднее касательное напряжение в поверхности сдвига;

$F$  - суммарная площадь срезаемого слоя;

$l$  - расстояние от центра тяжести суммарного сечения срезаемого слоя до оси метчика;

$k$  - безразмерный коэффициент, определяемый выражением:

$$k = \frac{\cos \gamma \cdot \cos \omega + \operatorname{tg} \eta \cdot \cos^2 \omega \cdot \sin \gamma + \operatorname{tg} \eta \cdot \sin^2 \omega}{\cos \omega \cdot \sin \beta_1 \cdot \cos(\beta_1 - \gamma) - \operatorname{tg} \eta \cdot \cos \omega \cdot \sin(\beta_1 - \gamma)}$$

здесь  $\gamma$  - передний угол;

$\eta$  - угол трения по передней поверхности;

$\beta_1$  - угол сдвига, измеренный в главной секущей плоскости.

Как показали расчеты, коэффициент  $k$  при изменении режимов резания и геометрии инструмента изменяется незначительно.

Для различных углов наклона винтовых канавок метчика получены средние значения коэффициента  $k$ , пригодные для широкого диапазона практически применяемых режимов резания.

Углам  $\omega = 0^\circ, 16^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  соответствуют значения  $k = 5,67; 4,33; 3,82; 4,13; 5,01; 5,2$ .

Суммарную площадь срезаемого слоя определяли из рис.1. Для метчиков с малыми углами заборного конуса  $\varphi < 15^\circ$  получили зависимость

$$F = \frac{S_1 H_1}{2} \left[ \frac{2(y_1 - y_2)}{H_1} - \frac{y_2^2 - y_1^2}{H_1^2} \right] \quad (I)$$

где  $y_1$  и  $y_2$  - текущие ординаты для режущих кромок первого и последнего выступов резб, участвующих в работе;

$S_1$  и  $H_1$  - величины, определяемые из рис. 1 и выражаемые через шаг резьбы – S

$$S_1 = 0,75S, \quad H_1 = 0,65S.$$

В процессе резбонарезания встречаются два случая.

1. Длина нарезаемой резьбы – L больше длины рабочей части заборного конуса метчика

$$L > \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi}$$

где h – рабочая высота профиля нарезаемой резьбы, для метрической резьбы  $h = 0,541S$

2. Длина нарезаемой резьбы – L меньше длины рабочей части заборного конуса метчика

$$L < \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi}$$

Ординаты  $y_1$  и  $y_2$  определяются величиной захода метчика (рис. 1).

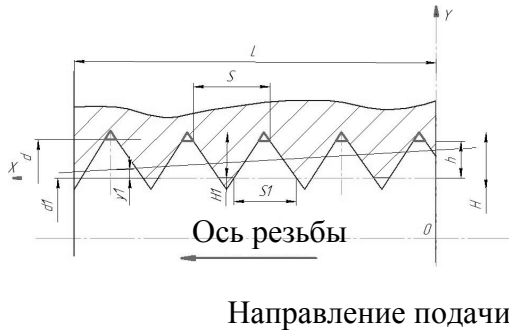


Рис. 1. Суммарная площадь срезаемого слоя

Для первого случая ( $L > \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi}$ ) при расчете суммарной площади срезаемого слоя в зависимости (I) подставляют следующие значения:

$$1. \text{ при } 0 \leq x \leq \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi} \quad y_1 = 0;$$

$$2. \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi} \leq x \leq L \quad y_1 = 0; \quad y_2 = h;$$

$$3. L \leq x \leq L + \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi} \quad y_1 = (x-L)\operatorname{tg}\varphi; \quad y_2 = h$$

Для второго случая ( $L < \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi}$ )

$$1. \text{ при } 0 \leq x \leq L \quad y_1 = 0; \quad y_2 = x \cdot \operatorname{tg}\varphi;$$

$$2. L \leq x \leq \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi}; \quad y_1 = (x-L)\operatorname{tg}\varphi; \quad y_2 = x \cdot \operatorname{tg}\varphi;$$

$$3. \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi} \leq x \leq \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi} + L; \quad y_1 = (x-L)\operatorname{tg}\varphi; \quad y_2 = h.$$

Расстояние от центра тяжести суммарного сечения срезаемого слоя до оси вращения с достаточной для практических расчетов точностью может быть определено по приближенной зависимости

$$l \approx 0,5(d - 0,55),$$

где  $d$  - наружный диаметр резьбы.

Касательное напряжения в поверхности сдвига определяли по формуле, при относительном сдвиге равном предельному  $\varepsilon = 2,5$

$$\tau = \frac{B \cdot \varepsilon^2}{1,5(C+1)}, \quad (2)$$

где  $B$  и  $C$  - величины, определяемые из зависимости нормального напряжения от относительного сдвига, получаемые при стандартном испытании образца из обрабатываемого материала на сжатие.

Максимальное значение крутящий момент принимает:

$$A). \text{ Для первого случая при } L \geq x \geq \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi}$$

$$y_1 = 0; \quad y_2 = h = 0,541S; \quad M_{n\max} = 0,119 \cdot k \cdot \tau \cdot S^2(d - 0,5S)$$

$$B). \text{ Для второго случая при } x = L \quad y_1 = 0; \quad y_2 = L \cdot \operatorname{tg}\varphi$$

$$M_{n\max} = 0,112 \cdot k \cdot \tau \cdot S^2 \left( \frac{3,08 \cdot L \cdot \operatorname{tg}\varphi}{S} - \frac{2,38 \cdot L^2 \cdot \operatorname{tg}^2\varphi}{S^2} \right) \cdot (d - 0,5S).$$

Крутящий момент, создаваемый силами, приложенными на задней поверхности метчика, в основном определяется величиной его износа. Задние поверхности, прилегающие к боковым режущим кромкам, как показали наблюдения, изнашиваются незначительно. Поэтому силы, действующие на них для метчиков, затылованных по профилю, незначительны и могут не учитываться при расчете. Момент, создаваемый силами, действующими на площадке износа задней грани, прилегающей к главной режущей кромке, определяется выражением

$$M_z = 0,5\tau_z h_z z(d - 0,5S)b_c$$

где  $\tau_z$  - среднее касательное напряжение на задней поверхности,

$h_z$  - ширина площадки износа по задней поверхности,

$z$  - число перьев метчика,

$b_c$  - суммарная длина активной части режущих кромок для одного пера определяется зависимостью:

$$b_c = \frac{\sum_1^n S_1 - \frac{S_1}{H_1} \sum_1^n y_n}{\cos \omega},$$

Здесь  $n$  - количество выступов резьбы одного пера метчика, участвующих в работе;

$y_n$  - текущие ординаты режущих кромок метчика.

Ординаты  $y_n$  для последовательно расположенных выступов резьбы метчика являются членами арифметической прогрессии с разностью

$$m = S \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Сумма членов арифметической прогрессии применительно к рассматриваемому случаю определяется

$$\sum_1^n y_n = \frac{y_2^2 - y_1^2}{2S \cdot \operatorname{tg} \varphi}.$$

Среднее касательное напряжение на площадке износа по задней грани принимали равным среднему касательному напряжению в поверхности сдвига. Правомерность этого предположения основывается на следующих соображениях:

1. ввиду малости износа метчиков по задней грани ( $h_s \leq 0,5 \text{ мм}$ ) на площадке контакта инструмента с заготовкой материал последней находится в состоянии пластичности, о чем свидетельствуют риски, оставляемые задней гранью на поверхности резания;
2. материал, находящийся в окрестности режущей кромки, пересекается поверхностью сдвига и поэтому получает такое же упрочнение;
3. анализ результатов, позволяет прийти к выводу, что касательное напряжение на площадке износа при малой ее ширине ( $h_s \leq 0,5 \text{ мм}$ ) близко по величине к среднему касательному напряжению в поверхности сдвига.

С учетом изложенного выражение для крутящего момента, действующего при нарезании метрической резьбы метчиками, получено в следующем виде:

$$M = 0,122 \cdot k \cdot \tau \cdot S^2 \left[ \frac{3,08(y_2 - y_1)}{S} - \frac{2,38(y_2^2 - y_1^2)}{S^2} \right] (d - 0,5S) + 0,5\tau h_s \cdot z (d - 0,5S) \cdot \left[ \frac{0,75(y_2 - y_1)}{\operatorname{tg} \varphi} - \frac{0,5(y_2^2 - y_1^2)}{S \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right]$$

Для проверки справедливости полученной формулы проводили измерение крутящего момента с записью на пленку осциллографа Н102 при обработке гаек М10 с высотой  $L = 8 \text{ мм}$  из стали 10кп. При этом применялись метчики с различными углами наклона винтовых канавок с износом по задней грани  $h_s = 0,1$  и одинаковыми другими геометрическими параметрами: угол заборного конуса  $\varphi = 3^\circ$ , передний угол  $\gamma = +8^\circ$ , число перьев  $z = 3$ .

Для стали 10кп расчетом по формуле (2) при  $B = 65 \text{ кг/мм}^2$ ,  $C = 0,31$  и  $\varepsilon = 2,5$  получено  $\tau = 43 \text{ кг/мм}^2$ .

С учетом приведенных данных получили следующую зависимость для крутящего момента:

$$M = 100k [2,09(y_2 - y_1) - (y_2^2 - y_1^2)] + 1140h_s \cdot z [2,26(y_2 - y_1) - (y_2^2 - y_1^2)] \quad [\text{кг} \cdot \text{мм}] \quad (3)$$

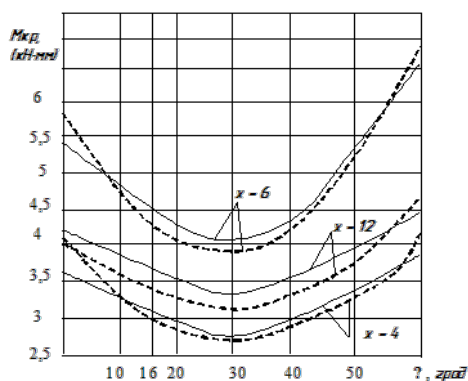


Рис.2. Изменение величины крутящего момента от угла наклона

На основании расчетных и опытных данных построены графики изменения величины крутящего момента в зависимости от угла наклона винтовых канавок метчика и величины захода метчика в нарезаемом отверстии (рис. 2).

Результаты расчета крутящего момента по зависимости (3) и полученные экспериментально при средней величине износа по задним граням  $h_3 = 0,1$  мм приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составление расчетных и экспериментальных крутящих моментов

$\omega$ , град	k	x, мм	По расчету			По опыту M, кгмм	Ошибка, %
			$M_n$ , кгмм	$M_z$ , кгмм	$M_p$ , кгмм		
1	2	3	4	5	6	7	8
0	5,67	4	216	147	363	390	+6,9
		6	310	220	530	560	+5,3
		12	240	170	410	385	-6,4
16	4,33	4	164	147	311	300	-3,2
		6	240	206	446	437	-2,0
		12	195	160	352	340	-3,2
30	3,82	4	140	140	280	270	0,36
		6	210	205	415	392	-5,8
		12	155	165	320	316	1,2
40	4,13	4	155	147	302	285	-6,0
		6	226	214	410	425	-3,5
		12	175	167	342	320	-6,8
50	5,01	44	190	147	337	326	-4,0
		6	270	205	475	452	-5,0
		12	200	160	360	335	-7,0
60	5,2	4	270	125	395	420	+6,0
		6	100	200	600	625	+4,0
		12	300	160	460	490	+6,0

### Выводы.

1. Полученные формулы дают результаты, близкие к экспериментальным. Расхождение расчетных результатов не превышает в худшем случае 0,7%; среднее расхождение составляет 4,8%, что приемлемо для практических расчетов.

2. Теоретическое и экспериментальное исследования показывают, что с увеличением угла наклона винтовых канавок происходит немонокотное изменение крутящего момента. С увеличением от 0 до 30° может уменьшаться, а при дальнейшем увеличении – увеличивается. Это объясняется тем, что в интервале углов от 0 до 30° происходит уменьшение проекции сил, действующих в главной секущей плоскости, на направление скорости резания. При дальнейшем увеличении угла наклона канавок происходит увеличение проекции сил, действующих вдоль режущей кромки.

**Список литературы:** Машиностроение. Энциклопедия/ Технология изготовления деталей машин Т. III-3/А.М.Дальский, А.Г.Суслов, Ю.Ф.Назаров и др.; под общ. ред. А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение, 2000. - 840с.

Поступила в редколлегию 01.10.2010