

П.А. Новиков, Ф.Н. Канареев, канд. техн. наук,  
С.М. Братан, д-р техн. наук, Севастополь, Украина

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЖУЩЕ-ДЕФОРМИРУЮЩИМИ МЕТЧИКАМИ**

*У статті запропоновано математичні залежності силової взаємодії робочих елементів інструменту і матеріалу заготовки при формоутворенні різьбових поверхонь ріжуче-деформуючими мітчиками в пластичних матеріалах. Залежності формуються з різальної і деформуючої складових що відображає конструктивні особливості режуче-деформуючих мітчиків. Вирази можуть бути використані при конструюванні інструменту і технологічної підготовки.*

*В статье предложены математические зависимости силового взаимодействия рабочих элементов инструмента и материала заготовки при формообразовании резьбовых поверхностей режуще-деформирующими метчиками в пластичных материалах. Зависимости формируются из режущей и деформирующих составляющих, что отражает конструктивные особенности режуще-деформирующих метчиков. Выражения могут быть использованы при конструировании инструмента и технологической подготовке.*

*The article suggested mathematical relations of force interaction of work items and material procurement tool for shaping screw of surfaces cutting-deforming taps in ductile materials. Dependencies are formed from the cutting and deforming components that reflect the structural features of the cutting-deforming taps. Expressions can be used in the design of tools and technology training.*

В процессе обработке резьбовых отверстий режущими метчиками в деталях из алюминия и алюминиевых сплавов, за счет склонности последних к адгезионному схватыванию, наблюдается наличие процесса наростообразования и образование нароста на передней поверхности зубьев метчика. Нарост придает процессу обработки как положительные характеристики (уменьшение износа передней и задней поверхностей зуба, уменьшение сил резания), так и отрицательные (невозможность обработки с заданной точностью, подрезание профиля резьбы, отсутствие стационарности в процессе обработки, изменение характера взаимодействий соседних зубьев с обрабатываемым материалом, изменение вида стружки приводящее к пакетированию, ухудшение шероховатости получаемой поверхности). Также, для образования резьб в пластичных материалах используются деформирующие метчики, работающие по принципу пластической деформации обрабатываемого материала, т.е. раскатыванию внутренней резьбовой поверхности. Однако, из-за особенностей течения материала в ходе формирования, на внутреннем диаметре резьбы образуются «кратеры», размеры которых не соответствуют предъявляемым требованиям.

Для обеспечения точности формообразования внутренних резб в пластичных материалах предложены конструкции режуще-деформирующих метчиков [1, 2], работающих по принципу предварительной пластической деформации обрабатываемой поверхности с последующим срезом нагартованного слоя.

При проектировании инструмента и технологической подготовки производства необходима информации о значениях сил и крутящих моментов действующих на метчик во время его работы. Предложенные различными авторами и проанализированные зависимости расчета сил резания при резбообработке [3, 4, 5] справедливы для условий обработки режущими или деформирующими метчиками. Для предложенных конструкций режуще-деформирующих метчиков подобных зависимостей не существует.

Целью работы является разработка математических зависимостей для определения силовых взаимодействий при формообразовании резьбовых поверхностей режуще-деформирующими метчиками.

Предлагаемая схема обработки алюминиевых сплавов и реализующие эту схему конструкции метчиков предполагает предварительное пластическое деформирование обрабатываемой поверхности, т.е. ее упрочнение и значительное увеличение поверхностных механических характеристик обрабатываемого материала, в конечном итоге влияющих на механику резания и ставящая под сомнение возможность применения ранее предложенных зависимостей.

Рассмотрим силовое взаимодействие зубьев заборного участка метчика с обрабатываемым материалом, образующего резьбовой профиль в детали (рисунок 1). Перья заборного участка метчиков новых конструкций содержат как режущие, так и пластически деформирующие зубья.



Рисунок 1 – Схема взаимодействия зубьев метчика с обрабатываемым материалом

Соответственно, при моделировании сил резания необходимо учитывать эти особенности конструкции и наличие режущей и деформирующей состав-

ляющей. Для вывода зависимостей, позволяющих рассчитывать составляющие силы, возникающие при пластическом деформировании и резании (в дальнейшем для простоты будем называть – силы резания), проведем декомпозицию подсистемы «зона контакта» на подсистемы «процесс резания» и «процесс пластического деформирования», то есть рассмотрим отдельно процесс резания и процесс пластического деформирования, после чего произведем синтез с целью получения итоговых моделей.

Для моделирования составляющих силы резания, возникающих при контактировании режущего зуба с обрабатываемой поверхностью, справедливы следующие выражения [6]:

$$P_{zi} = \tau_{c\partial\partial} S_{cpi} k_T \left( 1 + \mu \frac{k_H}{k_T} \right); \quad (1)$$

$$P_{yi} = \tau_{c\partial\partial} S_{cpi} k_H, \quad (2)$$

где  $\tau_{c\partial\partial}$  – предельное напряжение сдвига обрабатываемого материала;  $S_{cpi}$  – площадь среза  $i$ -м зубом метчика;  $\mu$  – коэффициент трения при резании;  $k_H$ ,  $k_T$  – коэффициенты, учитывающие влияние переднего угла и свойств материала заготовки на составляющие силы резания.

Коэффициенты  $k_H$  и  $k_T$  определяются по следующим зависимостям

$$k_T = -tg\gamma \frac{1 + \xi^2}{2} + 1; \quad (3)$$

$$k_H = -k_T \frac{tg\gamma}{2} (\xi + 1), \quad (4)$$

где  $\gamma$  – передний угол режущей кромки зерна;  $\xi$  – величина относительного сдвига материала.

Относительный сдвиг рассчитывается по зависимости:

$$\xi = \frac{K_L^2 - 2 \cdot K_L \cdot \sin\gamma + 1}{K_L \cdot \cos\gamma}. \quad (5)$$

Коэффициент трения  $\mu$  при контакте зуба метчика с материалом заготовки по данным [7] рассчитывается :

$$\mu = \frac{22500}{(90 - \gamma)^{2,46}} K_L^{0,0015(90 - \gamma)^{1,27}}, \quad (6)$$

где  $K_L$  – коэффициент усадки стружки.

После подстановки (3), (4), (5), (6) в (1) и (2) получим:

$$P_{zi} = \tau_{c\delta\sigma} S_{cp,i} \left( 1 - tg\gamma \cdot \frac{1 + \xi^2}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{11250 \cdot tg\gamma \cdot (\xi + 1)}{(90 - \gamma)^{2,46}} K_L^{0,0015(90 - \gamma)^{1,27}} \right); \quad (7)$$

$$P_{yi} = \frac{1}{2} \tau_{c\delta\sigma} \cdot S_{cp,i} \cdot tg\gamma \cdot \left( \frac{1}{2} tg\gamma \cdot (\xi^3 + \xi^2 + \xi + 1) - (\xi + 1) \right). \quad (8)$$

Для определения составляющих силы резания вычислим площади слоев, срезаемых каждым зубом заборной части метчика.

Площади, срезаемые зубьями, работающими по генераторной схеме, известны. Однако, для зубьев, реализующих профильную схему формирования резьбы необходимо разработать математические зависимости для дальнейшего силового расчета.

Полное количество зубьев заборного участка метчика:

$$i = \frac{0,726Z}{tg\varphi},$$

где  $Z$  – количество перьев метчика;  $\varphi$  – угол заборного конуса.

Площадь передней поверхности последнего зуба заборного участка определяется по зависимости

$$S_i = \frac{1}{2} h_i l_i,$$

где  $h_i$  – высота зуба,  $h_i = h_0 i$  ( $h_0$  – величина приращения зубьев заборного участка);  $l_i$  – длина основания зуба  $l_i = 2h_i / tg60^\circ = 3,466h_0 i$

Соответственно

$$S_i = 1,733h_0^2 i^2.$$

Однако, интересующая площадь среза представляет собой разность между площадями предыдущего и последующего зубьев:

$$S_{cp,i} = S_i - S_{i-1}.$$

После соответствующих преобразований имеем:

$$S_{cp,i} = 1,733h_0^2 (2i - 1), \quad (9)$$

причем  $h_0 = \frac{0,541P}{i} = \frac{0,745P}{Z} tg\varphi$ .

Для последующего анализа целесообразно площадь среза  $S_{cp,i}$  выразить как функцию толщины среза  $a$  (рисунок 1).

Толщина среза  $a$  может быть определена через величину приращения высоты зуба  $h_0$ :

$$h_0 = \frac{a}{\sin 30^\circ} = 2a. \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (9) принимает вид:

$$S_{cpi} = 6,932a^2(2i - 1). \quad (11)$$

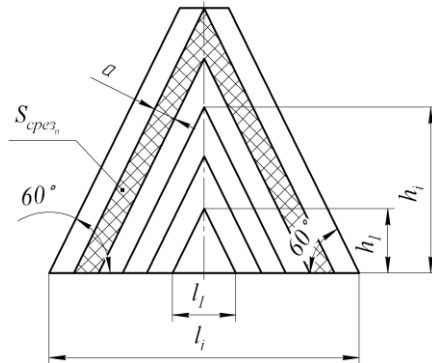


Рисунок 1 – Геометрические параметры профильной схемы формообразования резцы метчиком

После подстановки (11) в (7) и (8) получим:

$$P_{zi} = 6,932\tau_{c\partial\partial} \cdot a^2 \cdot (2i - 1) \left( 1 - \operatorname{tg}\gamma \cdot \frac{1 + \xi^2}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{11250 \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot (\xi + 1)}{(90 - \gamma)^{2,46}} K_L^{0,0015(90 - \gamma)^{1,27}} \right); \quad (12)$$

$$P_{yi} = 3,446 \cdot \tau_{c\partial\partial} \cdot a^2 (2i - 1) \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot \left( \frac{1}{2} \operatorname{tg}\gamma \cdot (\xi^3 + \xi^2 + \xi + 1) - (\xi + 1) \right). \quad (13)$$

Для моделирования работы деформирующих зубьев может быть использована зависимость [8], полученная для накатки резцы роликами:

$$\frac{dP}{d\gamma} = lpR_p \sqrt{1 + \Theta_{np}^2} \Omega_{np} \cos \psi, \quad (14)$$

где  $l$  – длина накатываемой резцы,  $\psi$  – угол трения,  $\Omega_{np}$  – приведенный угол охвата ролика,  $\Theta_{np}$  – приведенный угол охвата детали.

Для условий формообразования внутренних резцов деформирующими зубьями метчика зависимость (14) представляется в виде:

$$P_{zj} = \sqrt{2} S_j k \sigma_\tau \mu_1 \sqrt{\frac{k \sigma_\tau f}{E} \frac{(D + 2\rho)}{D} \cos \psi}; \quad (15)$$

$$P_{yj} = \sqrt{2} S_j k \sigma_\tau \sqrt{\frac{k \sigma_\tau f}{E} \frac{(D + 2\rho)}{D} \cos \psi}, \quad (16)$$

где  $S_j$  – площадь выдавливающего зуба;  $k$  – коэффициент, зависящий от марки материала ( $k = 3,0..3,5$ );  $\sigma_\tau$  – предел текучести;  $E$  – модуль упруго-

сти;  $D$  – диаметр обрабатываемого отверстия;  $\mu_1$  – коэффициент внешнего трения;  $\rho$  – радиус округления зуба метчика;  $f$  – коэффициент, учитывающий изменение условий трения вследствие воздействия СОТС при резбообработке.

Площадь зоны деформации может быть определена из выражения, предложенного [3]:

$$\begin{cases} S_j = \frac{2Z}{\sqrt{3}} \left( \frac{\pi}{180} (\rho^2 \zeta - r_B^2 \zeta_1) + \frac{1}{3} l_0 \alpha' \right), \\ l_0 = R_H - \rho \end{cases} \quad (17)$$

где  $\rho$  – радиус у резбообразующей вершины инструмента;  $r_B$  – внутренний радиус резьбы после прохождения резбообразующего гребня;  $\zeta, \zeta_1$  – центральные углы, соответствующие дуге контакта гребня инструмента с деталью;  $\alpha'$  – половина хорды двойной дуги контакта;  $R_H$  – наружный радиус резбообразующего гребня.

Зависимость (17) трудна для практического применения, так как составляющие ее переменные требуют экспериментального определения. Соответственно, применение данной зависимости для практических расчетов нецелесообразно. С достаточной степенью точности площадь зоны деформации может быть определена как площадь проекции от площади среза  $S_{ср.i}$  на боковую грань деформирующего зуба. Однако, так как углы затылования для правой и левой боковых граней разные, тогда каждая грань будет характеризоваться своей площадью проекции, а площадь деформации определяется как сумма двух площадей:

$$S_j = \frac{S_i}{2 \cos(90^\circ - \alpha_1)} + \frac{S_i}{2 \cos(90^\circ - \alpha_2)}. \quad (18)$$

После упрощений и с учетом (11), (18) примет вид:

$$S_j = 3,466a^2(2j-1) \left( \frac{1}{\sin \alpha_1} + \frac{1}{\sin \alpha_2} \right),$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы затылования на боковых гранях деформирующих зубьев.

Представленные зависимости (12), (13) и (15), (16) дают возможность определения теоретических значений сил, возникающих на единичном зубе метчика при формировании резьбы. Ниже приведены зависимости, моделирующие суммарные силы и крутящие моменты режущие-деформирующими метчиками при резбообработке:

$$P_z = \sum_{i=1}^z 6,932 \tau_{c\partial\delta} \cdot a^2 \cdot (2i-1) \left( 1 - \text{tg}\gamma \cdot \frac{1+\xi^2}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{11250 \cdot \text{tg}\gamma \cdot (\xi+1)}{(90-\gamma)^{2,46}} K_L^{0,0015(90-\gamma)^{1,27}} \right) +$$

$$+ \sum_{j=1}^m 4,901 \cdot k \cdot \sigma_\tau \cdot \mu_1 \cdot a^2 \cdot (2j-1) \cdot \left( \frac{1}{\sin\alpha_1} + \frac{1}{\sin\alpha_2} \right) \sqrt{\frac{k\sigma_\tau f}{E} \frac{(D+2\rho_j)}{D} \cos\psi}$$

$$P_y = \sum_{i=1}^z 3,446 \cdot \tau_{c\partial\delta} \cdot a^2 \cdot (2i-1) \cdot \text{tg}\gamma \cdot \left( \frac{1}{2} \text{tg}\gamma \cdot (\xi^3 + \xi^2 + \xi + 1) - (\xi+1) \right) +$$

$$+ \sum_{j=1}^m 4,901 \cdot k \cdot \sigma_\tau \cdot a^2 \cdot (2j-1) \cdot \left( \frac{1}{\sin\alpha_1} + \frac{1}{\sin\alpha_2} \right) \sqrt{\frac{k\sigma_\tau f}{E} \frac{(D+2\rho)}{D} \cos\psi}$$

где  $z, m$  – количество режущих и деформирующих зубьев метчика;

$$M_{кр} = \sum_{i=1}^z 6,632 \tau_{c\partial\delta} \cdot a^2 \cdot (2i-1) R_i \cdot \left( 1 - \text{tg}\gamma \cdot \frac{1+\xi^2}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{11250 \cdot \text{tg}\gamma \cdot (\xi+1)}{(90-\gamma)^{2,46}} K_L^{0,0015(90-\gamma)^{1,27}} \right) +$$

$$+ \sum_{j=1}^m 4,901 \cdot k \cdot \sigma_\tau \cdot \mu_1 \cdot a^2 \cdot (2j-1) \cdot R_j \cdot \left( \frac{1}{\sin\alpha_1} + \frac{1}{\sin\alpha_2} \right) \sqrt{\frac{k\sigma_\tau f}{E} \frac{(D+2\rho_j)}{D} \cos\psi}$$

где  $R_i, R_j$  – средние радиусы относительного положения режущих и деформирующих зубьев метчика ( $R_i = (d_1/2 + 0,3725 \cdot P \cdot i / Z \cdot \text{tg}\varphi)$ ,  $R_j = (d_1/2 + 0,3725 \cdot P \cdot j / Z \cdot \text{tg}\varphi)$ ).

Анализ предложенных зависимостей, позволяет сделать вывод, что распределение крутящих моментов по каждому из зубьев в большей степени определяется законом изменения площадей срезаемых или деформируемых слоев каждым зубом.

На рисунке 2 показан график зависимости крутящего момента  $M_{кр}$  от числа участвующих в работе зубьев метчика.

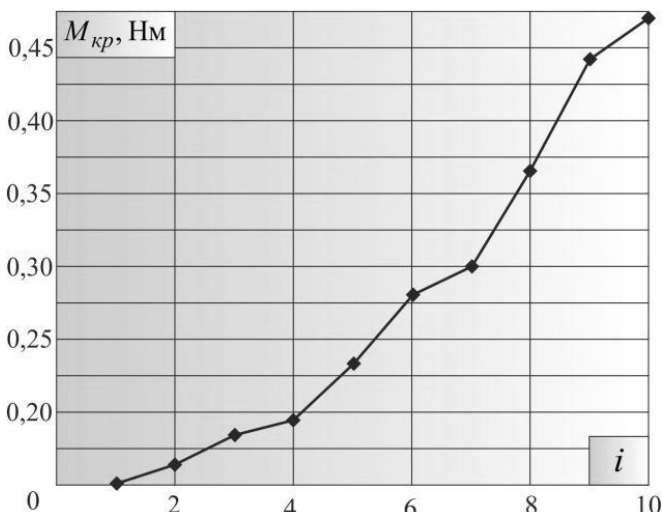


Рисунок 2 – Характер изменения крутящего момента от количества участвующих в работе зубьев

Предложены математические зависимости, характеризующие силовое взаимодействие при формообразовании резбовых поверхностей режущедоформирующими метчиками.

Дальнейшее развитие работы в авторы видят в уточнении математических зависимостей за счет учета динамики процесса резбообработки, износа рабочих поверхностей метчика, влияния кинематических характеристик процесса резания на выходные показатели технологической системы.

**Список использованных источников:** 1. Пат. на полезную модель № 64950 Украина. Метчик / Канареев Ф.Н., Харченко А.О., Новиков П.А.; заявитель и правообладатель Севастопольский нац. техн. ун-т.; опубл. 25.11.2011. 2. Пат. на полезную модель № 66082 Украина. Метчик/ Канареев Ф.Н., Харченко А.О., Новиков П.А.; заявитель и правообладатель Севастопольский нац. техн. ун-т.; опубл. 26.12.2011. 3. Верещака А.С. Резание материалов: учеб. для техн. вузов/ А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2002. – 400 с. 4. Харченко А.О. Силовые зависимости при нарезании резьб метчиками/ А.О. Харченко, Ф.Н. Канареев, И.О. Харченко // Отделочные методы обработки и инструменты в технологии машиностроения: сб. научн. тр. – Барнаул, 1984, – С. 19 – 25. 5. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики/ В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Серeda. – М.: Машиностроение, 1976. – 166 с. 6. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке/ А.В. Королев. – Саратов: 1975. – 189 с. 7. Внуков Ю.Н. Методика теоретического определения составляющих сил резания при токарной обработке/ Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская// Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 75. – 484 с. с 63-76. 8. Писаревский М.И. Накатывание точных резьб, шлицев и зубьев/ М.И. Писаревский. – Л.: Машиностроение, 1973. – 200 с

Поступила в редколлегию 15.06.2012