

этой площадке производятся не только детали для серийных двигателей Sam-146, но и обработка технологий и производство специальных деталей для новых перспективных двигателей, в частности ПД-14, изготавливаемого по отечественному проекту создания магистрального самолета МС-21.

Таким образом, данное производство наряду с функцией серийного завода исполняет роль опытной площадки ОДК по созданию новых инновационных продуктов, в том числе различными опытно-конструкторскими бюро. Причем данное производство опирается в основном на отечественные авторские технологии производства лопаток турбин, реализующиеся на отечественном оборудовании отечественным инструментом, что делает данное производство технически независимым от зарубежных производителей аналогичных продуктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поletaev, В.А., Цветков, Е.В. Совершенствование автоматизированных технологических процессов шлифо-

вания лопаток ГТД // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – № 4(22). – С. 34–37.

2. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П., Норин, А.О. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5(59). – С. 17–23.

REFERENCES

1. Poletaev V.A., Tsvetkov E.V. Improvement of automated grinding processes of GTE blades // *Science intensive technologies in mechanical engineering*. – 2013. – №4(22). – pp. 34-37.

2. Makarov V.F., Nikitin S.P., Norin A.O. Quality and productivity increase at profile creep feed grinding of turbine blades // *Science intensive technologies in mechanical engineering*. – 2016. – №5(59). – pp. 17–23.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров

УДК 621.9
DOI: 10.12737/22577

А.С. Ямников, д.т.н.,
А.О. Чуприков, к.т.н.,
А.И. Харьков, аспирант
(Тульский государственный университет,
300012. Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)
E-mail: Yamnikovas@mail.ru, ArtemLine@rambler.ru

Определение составляющих силы резания при точении в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала

Приведены аналитические зависимости, позволяющие без эксперимента рассчитать составляющие силы резания при точении с учетом износа инструмента по задней поверхности. Экспериментальная проверка показала приемлемость найденных зависимостей для практического применения, особенно важную при обработке материалов новых марок.

Ключевые слова: сила резания; аналитическое определение; износ инструмента.

A.S. Yamnikov, D.Eng.,
 A.O. Chuprikov, Can.Eng.,
 A.I. Kharkov, Post graduate student
 (Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012. Russia)

Definition of cutting force constituents at turning depending on stress-strain properties of material worked

Cited in the reference literature, empirical formula is usually acceptable for standard materials processed. When new materials have to repeat the experiments again. The article presents the analytical relationships derived from the generalization of the work of Russian and American scientists, in particular: VF Bobrov, NI Lvov, VS Kushner, a Merchant ME, Astakhov, V.P. These relationships relate the values of the components of the cutting force with time and the actual yield strength of the material being processed, making it much easier to calculate the components of the experiment of cutting force in turning based on the radius of curvature of the cutting edge and tool wear on the rear surface. Shrinkage factor chips taken approximately equal to one. Experimental verification showed acceptability found dependences for practical use, particularly important in the processing of materials of new brands.

Keywords: cutting force; analytical definition; tool wear.

Обычно в технологии машиностроения при расчете сил резания пользуются справочными таблицами или эмпирическими формулами [1]. При работе заводского технолога этого обычно достаточно. В случае углубленного исследования процессов резания приходится прибегать к экспериментальному определению необходимых силовых зависимостей [2 – 4].

Так, при определении напряжений в резеборезушей пластине численным моделированием авторам пришлось использовать формулы из работы Боброва В.Ф. [1], которые были выведены для конкретных случаев. В настоящее время появляются новые конструкционные и инструментальные материалы, поэтому для определения силовых зависимостей требуются новые эксперименты [4 – 5].

В работах Кушнера В.С. [6] и Астахова В.П. [7] дается обоснование возможности аналитического определения составляющих силы резания, что очень важно при численном моделировании процессов резания с использованием новых материалов [4 – 5].

В общем случае величина и направление равнодействующей силы R зависит от множества факторов: степени деформации металла в зоне резания, формы и размеров поперечного сечения среза, физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров режущего инструмента и степени его износа.

Ортогональная система для описания составляющих сил резания металла была впервые предложена М.Е. Merchant [8] (рис. 1).

Далее приведены зависимости составляющих силы резания, действующих на прямоли

нейном участке резца, полученные в работе [6]:

$$P_x = (F \cos \gamma - N \sin \gamma + N_1) \cdot \sin \psi; \quad (1)$$

$$P_y = (F \cos \gamma - N \sin \gamma + N_1) \cdot \cos \psi + N_2; \quad (2)$$

$$P_z = F \sin \gamma + N \cos \gamma + F_1; \quad (3)$$

где P_x, P_y, P_z – составляющие силы резания, разложенной по соответствующим координатным осям; γ – передний угол инструмента; ψ – угол между диагональю сечения срезаемого слоя и направлением подачи (рис. 2); F – сила трения на передней поверхности (рис. 3); N – сила нормального движения на передней поверхности инструмента; F_1, N_1 – сила трения и сила нормального давления на задней поверхности инструмента; N_2 – сила на участке зачищающей кромки инструмента.

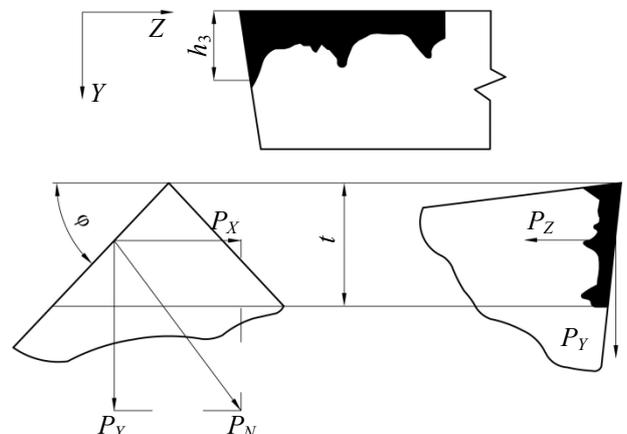


Рис. 1. Элементы износа и заточки резца

В свою очередь

$$P_x = (0,6\sigma_o ts \cos \gamma + \sigma_o h_3 (t / \sin \varphi) - \frac{0,8\sigma_o (st / \sin \beta) - 0,6\sigma_o st \sin(\beta - \gamma) + \sigma_o h_3 (t \sin \beta / \sin \varphi)}{\cos(\beta - \gamma)} - \frac{\mu\sigma_o h_3 (t / \sin \varphi) \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)} \sin \gamma) \sin \psi; \quad (5)$$

$$P_y = 2\sigma_o h_3 s + (0,6\sigma_o ts \cos \gamma + \sigma_o h_3 (t / \sin \varphi) - \frac{0,8\sigma_o (st / \sin \beta) - 0,6\sigma_o st \sin(\beta - \gamma) + \sigma_o h_3 (t / \sin \varphi) \sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)} - \frac{\mu\sigma_o h_3 (t / \sin \varphi) \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)} \sin \gamma) \cos \psi; \quad (6)$$

$$P_z = 0,6\sigma_o ts \sin \gamma + \mu\sigma_o h_3 (t / \sin \varphi) + \frac{0,8\sigma_o (st / \sin \beta) - 0,6\sigma_o st \sin(\beta - \gamma) + \sigma_o h_3 (t / \sin \varphi) \sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)} - \frac{\mu\sigma_o h_3 (t / \sin \varphi) \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)} \cos \gamma. \quad (7)$$

Совокупность уравнений (5 – 7) представляет собой математические зависимости составляющих силы резания, которые учитывают действительный предел прочности материала во время резания. Последнее обстоятельство позволяет надеяться на повышение объективности при расчете составляющих сил резания.

В работе [6] имеется аналитически не показанная величина h_3 . Из рассмотрения рис. 3 можно полагать, что это фаска износа по задней поверхности. Таким образом, когда инструмент новый, острозаточенный, или если инструмент изготовлен, например, из режущей керамики, то фаски износа нет. Однако задняя поверхность в любом случае контактирует с обработанной, вдавливаясь в неё для осуществления собственно процесса резания, как это показано в работе [8], посвященной определению минимальной удельной нормальной силы, необходимой для начала резания.

Определение минимальной удельной нормальной силы резания связано с определением минимальной толщины срезаемого слоя. К настоящему времени сложилось мнение, что минимальная толщина срезаемого слоя a_{\min} прямо зависит от радиуса скругления режущего клина ρ и в 2 – 4 раза меньше его [8]. Единственная теоретически обоснованная и удовлетворяющая экспериментальным данным зависимость, связывающая названные величины, предложена Львовым Н.И. [9]:

$$a_{\min} = 0,293\rho. \quad (8)$$

В теории пластичности решена задача определения нормальной силы, необходимой для вдавливания абсолютно жесткого круглого штампа радиусом r в пластическую среду.

Для указанного случая Безуховым Н.И. [10]

была получена зависимость

$$q = 4\tau_T r [1 - \theta \sin \theta - \cos \theta + (0,5\pi + 1) \sin \theta], \quad (9)$$

где q – равнодействующая давления для круглого штампа на единицу его длины; τ_T – предел текучести при чистом сдвиге; r – радиус штампа; θ – угол между нормальными к обрабатываемой поверхности и контуру инструмента в точке их контакта.

Так как при резании удельные деформации материала инструмента значительно ниже деформаций материала детали, то задачу об усилении вдавливания режущего клина в обрабатываемый материал можно решать по зависимости (9). Однако вследствие небольшой величины заднего угла металлорежущих инструментов кривая контакта режущего клина с обрабатываемым материалом в момент начала резания будет состоять не только из дуги радиуса ρ , но и из отрезка прямой FC (рис. 4), что не позволяет использовать формулу (9) в неизменном виде.

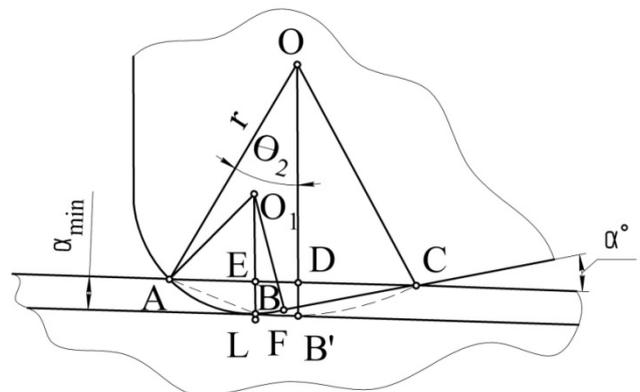


Рис. 4. Схема вдавливания режущего клина в обрабатываемый материал

Для использования формулы (9) заменим

кривую $ABFC$ дугой окружности $AB'C$ с приведенным радиусом r , величина которого

может быть найдена из треугольников AO_1E , AOD и CLE :

$$r = \frac{\left[\sqrt{a_{\min}(2\rho - a_{\min})} + \rho \operatorname{tg}(\alpha/2) + a_{\min} \operatorname{ctg} \alpha \right] + 4a_{\min}^2}{8a_{\min}}, \quad (10)$$

где α – задний угол инструмента.

Подставляя в уравнение (10) значение a_{\min} из уравнения (8), получим

$$r = 0,146\rho \left[2,83(0,707 + \operatorname{tg}(\alpha/2) + 0,293 \operatorname{ctg} \alpha)^2 + 1 \right]. \quad (11)$$

После замены режущего клина инструмента на круглый штамп с приведенным радиусом r угол контакта штампа с пластической средой можно найти по зависимости

$$\cos \theta_2 = (r - a_{\min})/r. \quad (12)$$

Принимая $\tau_T = \frac{2}{3} \sigma_T$ [10], получим

$$q = 8/3 \tau_T r [1 - \theta_2 \sin \theta_2 - \cos \theta_2 + (0,5\pi + 1) \sin \theta_2]. \quad (13)$$

Таким образом, для определения минимальной удельной нормальной силы резания по формуле (9) необходимо знать ρ инструмента и σ_T обрабатываемого материала.

Используя рис. 4, можем полагать длину контакта по задней поверхности $h_3 = AC$, причем AC – см. рис. 4, а h_3 – см. формулу (4) и рис. 2 и 3. Подставляя эту величину в формулы (5) – (7) можно аналитически найти значение силы резания по координатным осям.

Для оценки адекватности зависимостей (5) – (7) для разных величин износа по поверхности инструмента проведены экспериментальные исследования. Заготовка, изготовленная из стали 40X (ГОСТ 4543–71) устанавливалась в центрах, а в универсальный динамометр конструкции ВНИИ вставлялся резец M02L012520M08 (РФ) с механическим креплением режущей сменной многогранной пластины (СМП) WNMG 080408 MC, изготовленной из твердого сплава ТТ8115 производства фирмы TaeguTec (Южная Корея).

Заготовка обрабатывалась без применения СОЖ с режимами резания, указанными в таблице, и параметрами инструмента: $\gamma = 0^\circ$, $\varphi = 95^\circ$, $\varphi_1 = 5^\circ$, $r = 0,8$ мм.

Экспериментальные данные с динамометра в процессе резания проходили через усилитель, аналого-цифровой преобразователь и заносились в память ноутбука в виде базы данных в формате файла xls.

Полученные результаты обрабатывались по

специальной программе. В результате получены графики зависимости составляющих силы резания от износа пластинки по задней поверхности, представленные на рис. 5.

1. Режимы резания

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр обрабатываемой заготовки, мм	D	50,05
Диаметр обработанной поверхности, мм	d	48,04
Подача, мм/об	s	0,25
Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹	n	630
Глубина резания, мм	t	1
Скорость резания, м/мин	v	98,96

Там же представлены значения составляющих силы резания, рассчитанные при тех же режимах и условиях резания, что и в эксперименте, по формулам (5) – (7) модели силы резания [6] с ростом износа по задней поверхности резца.

Из графиков видно, что все составляющие силы резания увеличиваются при износе пластинки по задней поверхности. Это увеличение в большей мере относится к радиальной составляющей P_Y , которая в конкретном случае увеличивается в $k_{\text{изн.}P_Y} = 1,7$ раз, в то время как главная составляющая P_Z – только в 1,1 раза.

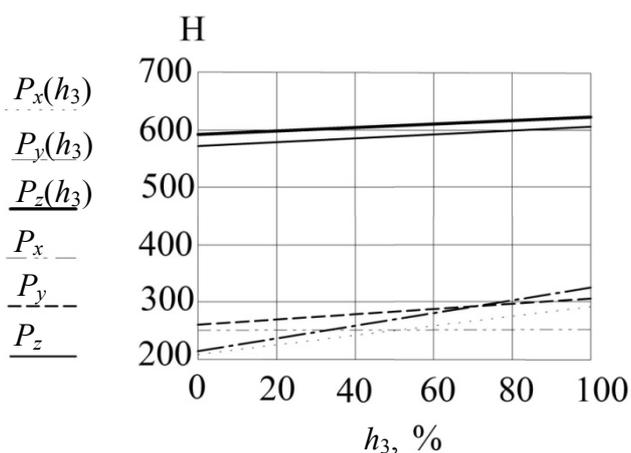


Рис. 5. Графики зависимостей составляющих силы резания от износа режущей пластины (радиус при вершине $r = 0,8$ мм):

$P_x(h_3)$, $P_y(h_3)$, $P_z(h_3)$ – расчетные значения, полученные по уравнениям (5)–(7); P_x , P_y , P_z – экспериментальные значения

Из сопоставления расчетных и экспериментальных данных, представленных на рис. 5, видно, что значения главной составляющей силы резания P_z практически совпадают. Таким образом, формула (7) достоверна. В тоже время формулы (5) и (6) для острого резца дают при расчете погрешность до 13 %. Тем не менее, для технологических расчетов это вполне допустимо и все формулы (5) – (7) можно рекомендовать для практических расчетов, в том числе и при моделировании процессов обработки резанием новых конструкционных материалов при известных временном и действительном пределе прочности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобров, В.Ф. Многопроходное нарезание крепежных резьб резцом. – М.: Машиностроение, 1982. – 104 с.
2. Ямников, А.С., Ямникова, О.А. Исследование силовых параметров процесса нарезания резьбы резцами с керамическими пластинками // Прогресивні технології і системи машинобудування. Донецк. – 2016. – № 1. – С. 151–157.
3. Ямников, А.С., Чуприков, А.О., Харьков, А.И. Утолщение стружки при точении высокопрочных сталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8. Ч. 1 – С. 194–201.
4. Ямников, А.С., Чуприков, А.О., Харьков, А.И. Повышение ресурса инструмента при нарезании усиленной упорной резьбы на заготовках из высокопрочных материалов // СТІН. – 2015. – №6. – С. 17–21.
5. A.S. Yamnikov, A.O. Chuprikov and A.I. Khar'kov. Extending Tool Life in Buttress-Thread Cutting on High-

Strength Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 12, pp. 953–956.

6. Кушнер, В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов: монография. – Иркутск. Изд-во Иркут. ун-та, 1982. – 180 с.

7. Astakhov V.P. Authentication of FEM in metal cutting. Chapter 1 in book Finite Element Method in Manufacturing Processes. J.P. Davim, Ed., New York: Wiley, 2011, P. 1-43.

8. Ямников, А.С., Мягков, Ю.В. Определение минимальной удельной нормальной силы, необходимой для начала резания // Известия вузов. – М.: Машиностроение, 1979. № 12. – С. 111–115.

9. Львов, Н.П. Определение минимальной возможной толщины срезаемого слоя // Станки и инструмент. – 1969. – № 4. – С. 21–33.

10. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Издательство: Высшая школа, 1961. – 532 с.

REFERENCES

1. Bobrov, V.F. *Multi-pass Fastening Thread Cutting with Cutter*. – М.: Mechanical Engineering, 1982. – pp. 104.
2. Yamnikov, A.S., Yamnikova, O.A. Investigation of power parameters of thread cutting process with ceramic plated cutters // *Promising Techniques and Systems of Mechanical Engineering*. Donetsk. – 2016. – № 1. – pp. 151–157.
3. Yamnikov, A.S., Chuprikov, A.O., Kharkov, A.I. Chip thickening at high-strength steel turning // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2016. – № 8. Part 1 – pp. 194–201.
4. Yamnikov, A.S., Chuprikov, A.O., Kharkov, A.I. Tool Life Increase at Reinforced Thrust Thread Cutting in High-Strength Blanks // *STIN*. – 2015. – №6. – pp. 17–21.
5. A.S. Yamnikov, A.O. Chuprikov and A.I. Khar'kov. Extending Tool Life in Buttress-Thread Cutting on High-Strength Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 12, pp. 953–956.
6. Kushnir, V.S. *Thermo-mechanical Theory of Ductile Materials Continuous Cutting*: monograph. – Irkutsk. Publishing House of Irkutsk University, 1982. – pp. 180.
7. Astakhov V.P. Authentication of FEM in metal cutting. Chapter 1 in book *Finite Element Method in Manufacturing Processes*. J.P. Davim, Ed., New York: Wiley, 2011, P. 1-43.
8. Yamnikov, A.S., Myagkov, Yu.V. Definition of minimum specific normal force essential for cutting beginning // *College Proceedings*. – М.: Mechanical Engineering, 1979. № 12. – pp. 111–115.
9. Lvov, N.P. *Definition of minimum-possible thickness of layer cut* // *Machines and Tools*. – 1969. – № 4. – pp. 21–33.
10. Bezukhov, N.I. *Fundamentals of Theory of Elasticity, Plasticity and Creep*. – М.: Higher School Publishing House, 1961. – pp. 532.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандожко