

УДК 621.91

СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ ХРОМОНИКЕЛЬМОЛИБДЕНОВЫХ СТАЛЕЙ

Ивашенко А.П.

Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», Камышин, e-mail: ivaschenko@kti.ru

В статье рассматривается силовая модель расчета сил, включающая уточнение и развитие представлений о процессе лезвийной обработки с помощью комплекса взаимосвязанных аналитических и эмпирических формул. Анализируется процесс продольного точения деталей из конструкционных хромоникельмолибденовых сталей твердосплавным режущим инструментом. Диапазон изменения теплопроводности режущего инструмента – 12,5–27 Вт/(м·К). Диапазон изменения: глубин резания t – 0,5–3 мм; скоростей резания V – 50–200 м/мин; подач S – 0,1–0,8 мм/об. Силы резания, действуют со стороны стружки и детали на режущий инструмент. Получены формулы для расчета сил, действующих при резании, с учетом сил трения и нормальных сил. Модель позволяет на основе кратковременного эксперимента по определению термоэлектродвижущей силы и основных формул резания определить внутренние силы при резании с минимальной погрешностью. Использование модели в дальнейших расчетах позволяет прогнозировать период размерной стойкости инструмента с учетом температуры в зоне резания и износа инструмента.

Ключевые слова: силы резания, твердосплавный режущий инструмент

PROCESSING CUTTING TOOLS CHROMIUM-NICKEL-MOLYBDENUM STEEL CONSIDERING CUTTING FORCES

Ivaschenko A.P.

Kamyshin Technological Institut (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: ivaschenko@kti.ru

The article discusses a model for calculating the forces, including the refinement and development of ideas about the course of processing with a complex interrelated analytical and empirical formulas. Analyzes the process of longitudinal turning parts made of structural steel chromium-nickel-molybdenum carbide cutting tools. Range of thermal conductivity of the cutting tool: 12,5–27 W/(m·K). Range: cutting depth t : 0,5–3 mm; cutting speed V : 50–200 m/min; innings S : 0,1–0,8 mm/rev. Cutting forces acting on the cutting tool. Calculated formulas for calculating cutting forces when taking into account the friction and normal forces. The model allows on the basis of short-term experiment to determine the thermoelectric power and of basic formulas to determine the internal forces at cutting material with minimum error. Using the model for further calculations predicts a period of dimensional stability of the instrument, taking into account temperature and tool wear.

Keywords: forces of cutting, carbide-tipped single-point the cutting tool

В связи с техническим прогрессом изменились многие задачи в области процессов резания: они стали сложнее и их решение требует введения новых понятий. Изменился и подход к этим задачам. Если раньше исследователь мог, исходя из рассматриваемого физического явления, «поставить» задачу и решить ее с помощью математических методов, то сейчас дело обстоит иначе. Во многих задачах, характеризующих процесс обработки материалов резанием, построение расчетной модели настолько тесно переплетается с процессом вычислений, что порой разделить эти процессы не представляется возможным.

В статье приводится силовая модель расчета сил, включающая уточнение и развитие представлений о процессе лезвийной обработки с помощью комплекса взаимосвязанных аналитических и эмпирических формул.

Силовая модель позволяет рассчитывать силы при лезвийной обработке конструкционных хромоникельмолибденовых сталей

твердосплавным режущим инструментом со СМП, при этом в расчетах оперативно учитываются физико-механические и теплофизические свойства контактирующей пары «стали типа: 40ХН2МА или 38Х2Н3М, или 40Х2Н2МА – твердый сплав» с помощью интегральной характеристики пары – термоэлектродвижущей силы.

В ходе создания модели установлено, что контактные процессы, сопровождающие взаимодействие компонентов системы резания, влияют не только на изнашивание инструмента, но и на силы по передней и задней граням инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью соответственно. Процессы эти тесно взаимосвязаны. По данным [7] на изнашивание режущего инструмента влияют: режимы резания; истинный предел прочности, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность обрабатываемого материала; коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность инструментального материала;

скорость деформации контактных слоев, большие деформации срезаемого слоя, высокая температура процесса резания.

Наиболее сильное влияние на изнашивание режущего инструмента при обработке материалов оказывают: истинный предел прочности и коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, большие деформации срезаемого слоя и высокая температура процесса резания [7].

При скоростном силовом деформировании с разрушением и отделением стружки от обрабатываемого материала инструмента возникают соответствующие нормальные контактные давления на гранях этого инструмента. Вследствие перемещения обрабатываемого материала и стружки на гранях инструмента под действием нормальных контактных давлений возникают касательные контактные давления, которые порождают нагрев трущихся поверхностей.

Следовательно, изнашивание режущих поверхностей и температура на этих поверхностях определяются сложными контактными давлениями.

Для рассматриваемой модели были приняты следующие допущения и уточнения:

1. В модели рассмотрена лезвийная обработка деталей типа цилиндров из конструкционных хромоникельмолибденовых сталей твердосплавным режущим инструментом. Диапазон изменения теплопроводности режущего инструмента – 12,5–27 Вт/(м·К). Диапазон изменения: глубин резания $t = 0,5–3$ мм; скоростей резания $V = 50–200$ м/мин; подач $S = 0,1–0,8$ мм/об.

2. Силы резания и усадка стружки инструмента рассчитываются с учетом конкретных свойств контактирующей пары «сталь – твердый сплав».

3. Рассматривается процесс продольного точения, в котором силы резания действуют со стороны стружки и детали на твердосплавный режущий инструмент со СМП.

4. Принимается допущение, что сила есть вектор, приложенный у вершины реза, которая является средним значением на всей длине контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью. Это допущение обусловлено тем, что при измерении сил приборами для контроля этих сил получаем среднее значение силы, изменяющееся во времени.

5. В модели рассматривается «нормальная работа инструмента», не рассматриваются «переходный» и «аварийный» режим работы инструмента. Это допущение обусловлено тем, что в процессе резания при нормальной работе инструмента величина износа на задней грани изменя-

ется незначительно, за достаточно большой промежуток времени.

В основе силовой модели лежит система сил (1), действующих в процессе лезвийной обработки (рис. 1), при этом на переднюю грань инструмента от давления сходящей стружки действует нормально к этой грани сила деформации срезаемого слоя N_1 , от перемещения передней грани относительно поверхности стружки действует сила трения F_1 , причем на заднюю грань инструмента от давления обрабатываемой поверхности действует нормально к этой грани сила деформации обработанной поверхности N_2 , отжимая инструмент, от перемещения задней грани инструмента относительно обрабатываемой поверхности действует сила трения F_2 . Таким образом, на передней грани инструмента действует результирующая сила R_1 , равная геометрической сумме сил N_1 и F_1 . На задней грани инструмента действует результирующая сила R_2 , равная геометрической сумме сил N_2 и F_2 . При лезвийной обработке действует общая результирующая сила R , равная геометрической сумме результирующих сил R_1 и R_2 . Общую результирующую силу R , как правило, в инженерных расчетах раскладывают на три составляющие силы: тангенциальную – P_z , осевую – P_x , радиальную – P_y . Уравнение в системе (1), содержащее силу P_z , отвечает за действие сил в вертикальной плоскости резания. Уравнение в системе (1), содержащее силу P_y , которая равна геометрической сумме сил P_{xy} и сил P_x , отвечает за действие сил в горизонтальной плоскости резания.

$$\begin{cases} P_z = N_1 \cdot \cos(\gamma) + F_1 \cdot \sin(\gamma) + F_2; \\ P_{xy} = -N_1 \cdot \sin(\gamma) + F_1 \cdot \cos(\gamma) + N_2. \end{cases} \quad (1)$$

Н.В. Талантов в своих работах [9] утверждал, что процессы, протекающие на передней и задней гранях инструмента, взаимосвязаны. О взаимосвязи процессов резания на передней и задней гранях инструмента также говорится в работах А.Б. Кравченко [5] и книге В.А. Кривоухова [6]. Так в системе (1) определяется погрешность расчета сил в левой и в правой частях системы уравнений, что позволяет минимизировать ошибки при расчетах.

Для определения сил резания P_z и P_x и P_y (рис. 1) воспользуемся формулами в литературе [1], полученными на основании экспериментальных данных А.Л. Плотноковым, который предложил способ определения сил резания при лезвийной обработке через термоэлектродвижущую силу пробного прохода $\mathcal{E}_{пр}$, что повышает точность определения сил резания до 8–9%. Поэтому данный способ будет применен при расчетах сил резания в силовой модели.

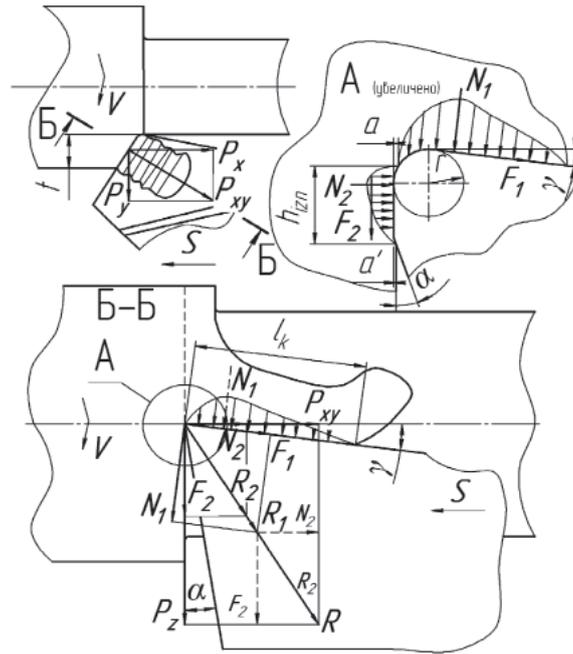


Рис. 1. Силы, действующие при лезвийной обработке материалов

После проведения экспериментальных исследований [4] по определению термоЭДС \mathcal{E}_{np} кратковременного пробного прохода ($V = 100$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 1$ мм) для стали 40ХН2МА и твердого сплава P10 (Т15К6), с теплопроводностью 12,5–27 Вт/(м·К) по способу А.Л. Плотникова получены зависимости сил резания (исходные зависимости в [1], для остальных хромоникельмолибденовых сталей зависимости приведены в источнике [4]).

Осевая сила резания P_x рассчитывается по формуле

$$P_x = 9,8 \cdot (360 + 7 \cdot \mathcal{E}_{np}) \cdot t^1 \cdot S^{0,5} \cdot V^{-0,4}, \text{ Н.} \quad (2)$$

Радиальная составляющая силы резания P_y рассчитывается по формуле

$$P_y = 9,8 \cdot (300 + 10 \cdot \mathcal{E}_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot S^{0,6} \cdot V^{-0,3}, \text{ Н.} \quad (3)$$

Главная составляющая сила резания P_z рассчитывается по формуле

$$P_z = 9,8 \cdot (320 + 5,5 \cdot \mathcal{E}_{np}) \cdot t^1 \cdot S^{0,75} \cdot V^{-0,15}, \text{ Н.} \quad (4)$$

Суммарная сила резания P_{xy} , действующая между срезаемым слоем и передней гранью инструмента, и общая результирующая сила резания R_{xy} в левой части системы (1) рассчитываются по формулам

$$P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \text{ Н и } R_{xy} = \sqrt{P_z^2 + P_{xy}^2}, \text{ Н.} \quad (5)$$

$$K = \frac{t^{0,1} \cdot (0,0625 \cdot \mathcal{E}_{np})^{0,28}}{0,56 \cdot \sin(\gamma) + (0,102 - 0,085 \cdot \sin(\gamma)) \cdot (\ln(t \cdot S^{0,45} \cdot V^{0,9}) + 0,15)} \quad (7)$$

В системе (1) силу деформации срезаемого слоя N_1 можно принять равной силе пластического сжатия при деформировании различных образцов на сжатие, которое получено проф. М.А. Большаниной и В.Д. Кузнецовым [6]:

$$N_1 = \sigma_t \cdot \zeta \cdot S \cdot t \cdot K^m, \text{ Н,} \quad (6)$$

где σ_t – предел текучести материала; K – коэффициент поперечной усадки стружки; m – показатель политропы сжатия (по И.С. Праведникову $m = 0,61$, для конструкционных среднеуглеродистых хромоникельмолибденовых сталей [6]); ζ – поправочный коэффициент, учитывающий отношение справочного предела текучести [8] к пределу текучести, указанному в сертификате качества на обрабатываемый материал: $\zeta(38X2H3M) = 1,39$; $\zeta(40XН2МА) = 1,66$; $\zeta(40X2H2MA) = 1,43$.

Коэффициент поперечной усадки стружки в формуле (6) определяется по формуле B_y [2], но в первоначальную формулу B_y добавлена величина термоЭДС пробного прохода \mathcal{E}_{np} , полученная на основе экспериментальных данных в [4], учитывающая влияние теплопроводности инструментального материала на коэффициент усадки стружки.

Сила трения F_1 зависит от среднего коэффициента трения между срезаемым слоем и передней гранью инструмента, который выражается через угол сдвига и коэффициент поперечной усадки стружки [9] и определяется из системы (1) с учётом формул (6) и (7).

$$F_1 = \left(1 - \operatorname{tg} \left(\left(\operatorname{arctg} \left(\frac{\cos(\gamma)}{K - \sin(\gamma)} \right) \right) - \gamma \right) \right) \cdot N_1, \text{ Н.} \quad (8)$$

Расчёт силы деформации обработанной поверхности, отжимающей инструмент, N_2 и силы трения F_2 производится из системы уравнений (1).

$$F_2 = P_z - N_1 \cdot \cos(\gamma) - F_1 \cdot \sin(\gamma), \text{ Н;} \quad (9)$$

$$N_2 = P_{xy} + N_1 \cdot \sin(\gamma) - F_1 \cdot \cos(\gamma), \text{ Н.} \quad (10)$$

Необходимо заметить, что задний угол в системе уравнений (1) и в формулах (9) и (10) не участвует, так как рассматривается условие, когда резец имеет фаску линейного износа на задней грани инструмента (рис. 1).

Определяются результирующие силы R_1 , R_2 и R в правой части системы (1):

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{F_1^2 + N_1^2}, \text{ Н;} \\ R_2 &= \sqrt{F_2^2 + N_2^2}, \text{ Н;} \\ R &= R_1 + R_2, \text{ Н.} \end{aligned} \quad (11)$$

Определяется погрешность Δ результатов расчета сил резания в левой и правой частях системы (1), то есть процентное расхождение между результирующей силой R в формуле (11) и результирующей силой R_{zxy} , определенной по формуле (5) (рис. 1).

$$\Delta = \frac{R - R_{zxy}}{R} \cdot 100 \%. \quad (12)$$

Для контактирующей пары «сталь 40ХН2МА – твердый сплав Т15К6», у которой термоЭДС пробного прохода изменяется с 11 до 16 мВ, были проведены расчёты сил по системе уравнений (1), где основная часть результатов расчёта показана на рис. 2.

По рис. 2 можно сделать заключение, что с увеличением скорости резания сила резания R_{zxy} уменьшается, а при увеличении глубины резания и подачи при постоянной скорости резания сила R_{zxy} увеличивается, что не противоречит общепринятым данным, например, в [1].

В идеальной модели левая и правая части системы уравнений (1) должны быть равны друг другу, то есть погрешность расчёта Δ должна быть равна нулю, а сила R_{zxy} равна силе R (рис. 1). В полученной модели есть процент расхождения между силами R_{zxy} и R , который не превышает 3%, так как входные зависимости, приведенные выше, имеют относительные погрешности, по-

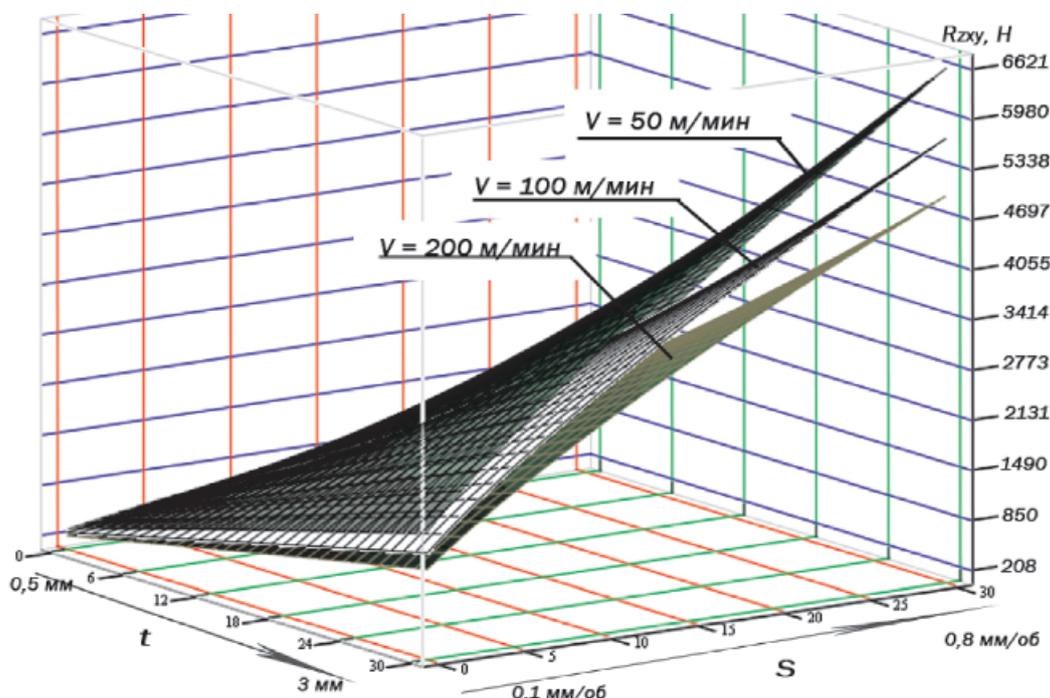


Рис. 2. Общая результирующая сила R_{zxy} . Пара «Сталь 40ХН2МА – Т15К6», $\mathcal{E}_{np} = 12,3$ мВ. Передний угол 0° , главный угол в плане 75° , вспомогательный угол в плане 15°

тому что получены на основе экспериментально-статистических методов исследования, о чём подробно изложено в [4].

Выводы

После уточнения и развития известных методик и подходов к описанию процесса резания материалов, а также с учётом допущений, изложенных выше, и дополнительных экспериментальных исследований [4] получены формулы для расчёта сил, действующих при резании, формулы (1)–(10). С помощью вышеприведенных расчётных формул сил в силовой модели (1) на основе кратковременного эксперимента по определению термоэлектродвижущей силы пробного прохода можно определить внутренние силы при резании с минимальной погрешностью для контактирующей пары «стали типа: 40ХН2МА или 38Х2Н3М, или 40Х2Н2МА – твердый сплав с теплопроводностью 12,5–27 Вт/(м·К)». При определении сил оперативно учитываются физико-механические и теплофизические свойства контактирующей пары. Использование модели в дальнейших расчетах [4] позволяет прогнозировать период размерной стойкости инструмента с учётом температуры в зоне резания и износа инструмента.

Список литературы

1. Бржозовский Б.М., Плотников А.Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2001. – 88 с.
2. Ву. Подробная модель силы резания и ее применение при срезании волнистости обработанной поверхности // Современное машиностроение. Сер. Б. – 1989. № 2. – С. 155–164.
3. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
4. Иващенко А.П. Интенсификация режимов резания при лезвийной обработке конструкционных хромоникельмолибденовых сталей на основе уточнения и развития силовой модели: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов. 2011. – 210 с.

кельмолибденовых сталей на основе уточнения и развития силовой модели: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов. 2011. – 210 с.

5. Кравченко А.Б. Обоснование заданных эксплуатационных характеристик деталей ГТД путем целенаправленного регулирования остаточных напряжений при лезвийной обработке: дис. ... канд. техн. наук. – Куйбышев, 1990.

6. Кривоухов В.А. Обработка металлов резанием / В.А. Кривоухов, Б.Е. Бруштейн, С.Е. Егоров. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1958. – 628 с.

7. Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента. – М.: Mashgiz, 1958. – 355 с.

8. Марочник сталей и сплавов в/ А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.; Под общ. ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

9. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

References

1. Brzhozovskij B.M., Plotnikov A.L. Obespechenie nazhzhnosti opredelenija rezhimov lezviijnoj obrabotki dlja avtomatizirovannogo stanochnoho oborudovaniya. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2001. 88 p.
2. Vu. Podrobnaja model sily rezaniya i ee primenenie pri srezanii volnistosti obrabotannoj poverkhnosti. Sovremennoe mashinostroenie. Ser. B. 1989. no. 2. pp. 155–164
3. Granovskij G.I., Granovskij V.G. Rezanie metallov: uchebnik dlja mashinost. i priborostr. spec. vuzov. Moskva: Vyssh. shk., 1985. 304 p.
4. Ivashhenko A. P. Intensifikacija rezhimov rezaniya pri lezviijnoj obrabotke konstrukcionnykh khromonikelmolibdenovykh stalej na osnove utochneniya i razvitiya silovojj modeli: dis. kand. tekhn. nauk. Saratov. 2011. 210 p.
5. Kravchenko A.B. Obosnovanie zadannykh ehkspluatacionnykh kharakteristik detalej GTD putem celenappravlenogo regulirovaniya ostatochnykh naprjazhenij pri lezviijnoj obrabotke: diss. kand. tekhn. nauk. Kujjbyshhev, 1990.
6. Krivoukhov V.A., Brushtejjn B.E., Egorov S.E. Obrabotka metallov rezaniem. Moskva: Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoj promyshlennosti, 1958. 628 p.
7. Loladze T.N. Iznos rezhushhego instrumenta. Moskva: Mashgiz, 1958. 355 p.
8. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskij Ju.V. Marochnik stalej i splavov. 2-e izd., dop. i ispr. Moskva: Mashinostroenie, 2003. 784 p.
9. Talantov N.V. Fizicheskie osnovy processa rezaniya, iznashivaniya i razrusheniya instrumenta. Moskva: Mashinostroenie, 1992. 240 p.