

**ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ РЕЗАНИЯ
ЗАРУБЕЖНЫХ НАУЧНЫХ ШКОЛ****Н.А. Попов**nickpopov1996@mail.ru
SPIN-код: 8735-5312

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведен краткий обзор и выполнен анализ методов теоретического определения силы резания, разработанных в разные годы в зарубежных научных школах. Предложены схемы расчета составляющих силы резания, представленные в оригинальных публикациях, аналитические модели и принципиальные подходы авторов к рассматриваемой проблеме. Проведены аналогии с отечественными разработками. Анализ выполнен на основе авторского перевода англоязычных публикаций таких специалистов, как Ф. Клоке (F. Klocke), М. Мёрчант (M.E. Merchant), Д. Дэвим (J.P. Davim) и В.П. Астахов (V.P. Astakhov), представляющих принципиально различающиеся подходы к вопросам определения динамических и энергетических характеристик процесса резания.

Ключевые слова

Резание металлов, силы резания, наружное точение, резец, механическая обработка, стружкообразование, зона резания, угол сдвига, износ инструмента

Поступила в редакцию 06.11.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

В процессе резания на инструмент действуют силы сопротивления перемещению его относительно обрабатываемой заготовки. Результирующую этих сил принято называть силой резания. Сила резания является ключевой величиной, показателем процесса, поскольку для решения ряда практических задач (например, определения эффективной мощности, затрачиваемой на резание, прогиба заготовки и, следовательно, точности обработки, расчета энергозатрат) требуется знание как значения действующей силы резания, так и направление ее действия. Кроме того, составляющие силы резания необходимо знать при расчетах механизма подачи и главного движения станка. Зная силу резания, можно регулировать процесс резания: управлять энергопотреблением станка, оценивать, а затем изменять температуру в зоне резания, предотвращать вибрации и т. п. Это определяет большой интерес исследователей к проблеме прогнозирования и анализа силы резания и широкий спектр научных публикаций как прошлых лет, так и настоящего времени [1–12].

В научной литературе описаны два основных способа определения силы резания: теоретический и экспериментальный, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Представленная статья посвящена теоретическим методам, которые формализуют процессы, происходящие в зоне резания, такие как пластическое деформирование материала заготовки, тепловыделение, тре-

ние между инструментом и заготовкой, а также трение между инструментом и стружкой.

Теоретических подходов к определению силы резания довольно много. Исследователи не останавливаются на одном методе, а ищут разные способы определения силы резания. В статье приводятся примеры различных подходов, начиная от фундаментальных способов, используемых годами, и заканчивая новаторскими, которые, по мнению авторов, показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Современные работы молодых ученых опираются в основном на отечественные исследования, что является результатом качественной и фундаментальной работы предшественников; но исследования зарубежных коллег также могут представлять интерес для формирования профессионального кругозора и широты восприятия проблемы.

Данный обзор дает возможность сравнить традиционные отечественные методы теоретического определения силы резания с зарубежными аналогами, провести анализ и осознать глубину рассматриваемой проблемы.

Сначала рассмотрим метод Мёрчанта (Merchant M.E.). Это американский ученый и исследователь в области резания, работавший в первой половине XX века. Его наиболее известными публикациями являются [13–15]. Мёрчант представил свой метод теоретического определения сил резания в 1940-х годах. Этот метод многие западные исследователи считают основополагающим и базовым при расчетах сил резания.

Мёрчант использует следующую ортогональную модель, которая так и называется — «круговая диаграмма Мёрчанта» (рис. 1).

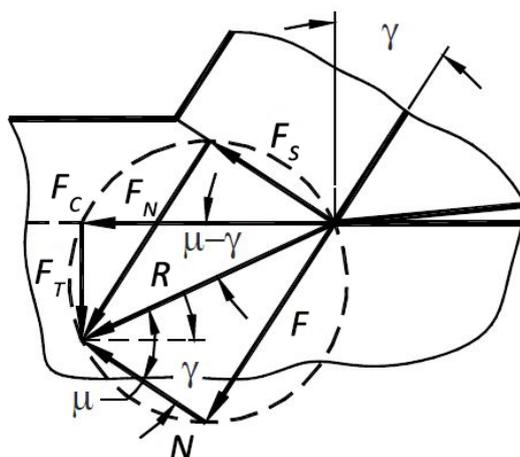


Рис. 1. Круговая диаграмма Мёрчанта

Суть диаграммы в том, что результирующую силу резания можно разложить на различные ортогональные составляющие, которые по определению вписанного угла, опирающегося на диаметр — вектор силы резания — будут вписаны в одну окружность. Как можно видеть, результирующая сила резания

R раскладывается на силу трения между инструментом и стружкой F и нормальную силу N . Угол μ между N и R есть угол трения. Также сила R раскладывается вдоль плоскости сдвига на силу сдвига F_s , которая, по мнению Мёрчанта, затрачивается на сдвиг металла, и нормальную силу F_n , которая оказывает сжимающее усилие плоскости сдвига. Кроме того, сила R раскладывается по направлению движения инструмента на F_c , названную Мёрчантом силой резания и F_T , силу отжима резца. Запишем все вышесказанное в векторном виде:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F} + \mathbf{N};$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_n;$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_T.$$

Определение силы резания основывается на расчете силы сдвига F_s . В 1941 году Эрнст и Мёрчант предложили следующее уравнение для ее нахождения:

$$F_s = \frac{\tau_y A_c}{\sin \varphi},$$

где τ_y — напряжение сдвига материала заготовки; φ — угол сдвига; A_c — площадь сечения срезаемого слоя до деформации.

Согласно рис. 1:

$$F_c = \frac{F_s \cos(\mu - \gamma)}{\cos(\varphi + \mu - \gamma)}.$$

Учитывая первое уравнение, можно записать:

$$F_c = \frac{\tau_y A_c \cos(\mu - \gamma)}{\sin \varphi \cos(\varphi + \mu - \gamma)}.$$

Отметим, что метод Мёрчанта сильно перекликается с известным отечественным методом, представленным Н.Н. Зоревым [16, 17], который рассматривает аналогичную схему (рис. 2) и приводит следующее выражение:

$$R_z = \tau_y \frac{ab \cos \omega}{\sin \varphi \cos(\varphi + \omega)},$$

где R — сила стружкообразования; a — толщина среза; b — ширина среза; ω — угол действия, т. е. угол между вектором силы \mathbf{R} и вектором скорости резания \mathbf{V} .

Отметим, что метод Мёрчанта не учитывает износ инструмента и трение по задней поверхности. Также при использовании этого метода в производственных условиях затруднение вызовет определение напряжения сдвига материала заготовки τ_y , угла трения μ и угла сдвига φ .

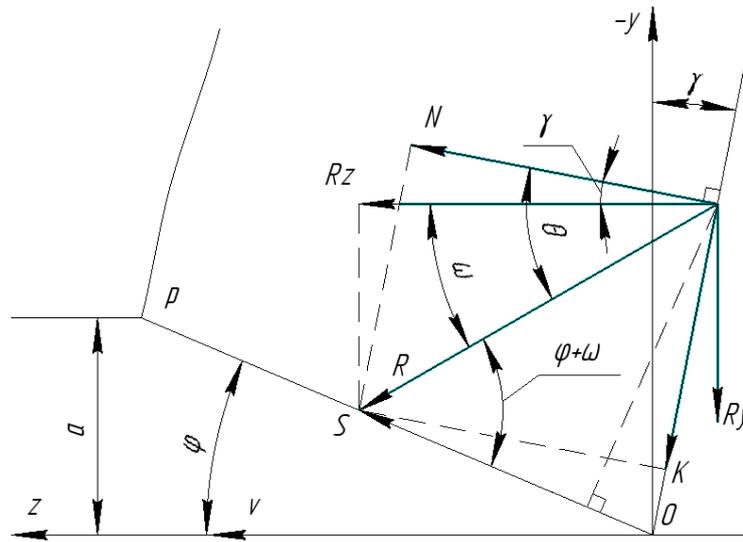


Рис. 2. Схема Н.Н.Зорева:

R — сила стружкообразования; R_z — главная (тангенциальная) проекция силы стружкообразования; R_y — радиальная проекция силы стружкообразования; a — толщина среза; ω — угол действия; φ — угол сдвига; γ — передний угол

Теоретическим развитием метода Мёрчанта является распространенная в современной научной литературе теория Клоке (Клоке Ф.). Фриц Клоке — известный немецкий исследователь в области технологии производства. Наиболее востребованными публикациями являются [18–20].

В своем подходе автор в большей степени опирается на теорию стружкообразования и рассматривает идеальные условия резания, т. е. идеально острую кромку. Расчетная схема с круговой диаграммой представлена на рис. 3, а.

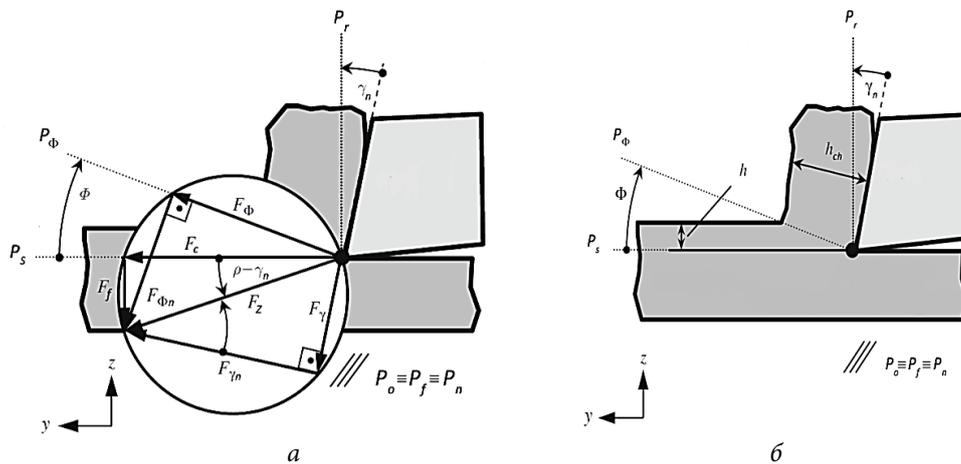


Рис. 3. Схема Клоке:

P_ϕ — след плоскости сдвига; P_r — след основной плоскости; F_ϕ — сила сдвига; F_c — сила резания; F_f — сила подачи; F_z — результирующая сила; Φ — угол сдвига, ρ — угол трения; h — глубина резания

Предполагается, что угол сдвига есть функция напряжений сдвига в плоскости сдвига:

$$\tau_{\Phi} = \frac{|\mathbf{F}_{\Phi}|}{A_{\Phi}}; A_{\Phi} = b \frac{h}{\sin \Phi},$$

где A_{Φ} — площадь сечения срезаемого слоя до деформации; h — глубина резания (рис. 3, б); b — ширина резца.

Силу F_{Φ} можно записать через результирующую F_z :

$$|\mathbf{F}_{\Phi}| = |\mathbf{F}_z| \cos(\Phi + \rho - \gamma_n).$$

Наконец, силу F_z можно записать, используя все вышесказанное:

$$|\mathbf{F}_z| = \frac{\tau_{\Phi}}{\sin \Phi \cos(\Phi + \rho - \gamma_n)} bh.$$

Зависимости F_c от F_z :

$$|\mathbf{F}_c| = |\mathbf{F}_z| \cos(\rho - \gamma_n),$$

и, следовательно, сила резания

$$|\mathbf{F}_c| = \frac{\cos(\rho - \gamma_n) \tau_{\Phi}}{\sin \Phi \cos(\Phi + \rho - \gamma_n)} bh.$$

Заметим, что описанные выше методы очень похожи. У Мёрчанта сила резания характеризуется выражением

$$F_c = \frac{\tau_y A_c \cos(\mu - \gamma)}{\sin \varphi \cos(\varphi + \mu - \gamma)},$$

у Зорева:

$$R_z = \tau_y \frac{ab}{\sin \varphi} \frac{\cos \omega}{\cos(\varphi + \omega)}.$$

Наконец, у Клоке:

$$|\mathbf{F}_c| = \frac{\cos(\rho - \gamma_n) \cdot \tau_{\Phi}}{\sin \Phi \cos(\Phi + \rho - \gamma_n)} bh.$$

Приведенные формулы практически одинаковы, различие лишь в обозначениях. Можно утверждать, что в целом это один и тот же подход к теоретическому определению силы резания.

Иную методику использует Дэвим (Davim J.P.). Дэвим — португальский специалист по резанию металлов. Известными публикациями являются [21, 22].

У автора энергетический подход к определению силы резания. Примечательно, что учитывается износ инструмента — это приближает вычисления к реальному технологическому процессу. Записывается энергетический баланс внутри системы:

$$P_c = F_c v = P_{pd} + P_{fR} + P_{fF} + P_{ch},$$

из которого сила резания вычисляется как

$$F_c = \frac{P_{pd} + P_{fR} + P_{fF} + P_{ch}}{v},$$

где P_{pd} — энергия, расходуемая на пластическую деформацию снимаемого слоя; P_{fR} — энергия, расходуемая на взаимодействие инструмент — стружка; P_{fF} — энергия, расходуемая на взаимодействие инструмент — заготовка; P_{ch} — энергия, расходуемая на образование новой поверхности.

Энергию P_{pd} , расходуемую на пластическую деформацию снимаемого слоя, можно вычислить, зная коэффициент сжатия стружки и параметры деформирования обрабатываемого материала:

$$P_{pd} = \frac{K(1,15 \ln \zeta)^{n+1}}{n+1} v A_w,$$

где K — коэффициент упрочнения, Н/м²; n — экспонента/показатель упрочнения обрабатываемого материала; ζ — коэффициент сжатия стружки; A_w — площадь сечения срезаемого слоя до деформации:

$$A_w = d_w f.$$

Здесь d_w — глубина резания; f — подача на оборот.

Энергию, расходуемую вследствие трения при контакте инструмент — стружка, можно рассчитать как

$$P_{fR} = \tau_c l_c b_{IT} \frac{v}{\zeta},$$

где $\tau_c = 0,28\sigma_{UTS}$ — среднее напряжение сдвига при контакте инструмент — заготовка; σ_{UTS} — предел прочности обрабатываемого материала; l_c — длина контакта инструмента и стружки; b_{IT} — истинная ширина стружки.

Энергию, расходуемую вследствие трения при контакте инструмент — заготовка, рассчитывают следующим образом:

$$P_{fF} = F_{fF} v,$$

где F_{fF} — сила трения при контакте инструмент — заготовка.

Энергию, расходуемую на образование новой поверхности P_{ch} , рассчитывают как результат перемножения энергии, требуемой на образование одной плоскости сдвига, и количества плоскостей сдвига, формирующихся в секунду:

$$P_{ch} = E_{fr} f_{cf},$$

где f_{cf} — частота образования стружки, т. е. количество формирующихся плоскостей сдвига в секунду; E_{fr} — энергия разрушения (излома) на одной плоскости сдвига.

Как описано выше, в теории Дэвида рассматривается сумма энергетических составляющих для определения силы резания. Тем не менее на производстве этот способ, скорее всего, неприменим. Весьма трудоемко рассчитать все энергетические компоненты уравнения, а некоторые автор и вовсе не поясняет, как определить (например, не ясно, как установить энергию разрушения на плоскости сдвига E_{ff}). Можно сделать вывод, что с теоретической точки зрения подход наиболее полно описывает процесс резания и дает подробное представление о силе резания, однако на практике им будет затруднительно воспользоваться.

Автор также приводит сравнение экспериментального определения и теоретического. При точении стали AISI E52100 со скоростью $v = 90$ м/мин, подачей $s = 0,2$ мм/об и глубиной резания $t = 2$ мм расхождение расчетного и экспериментального значений составляет 6 % (998 и 940 Н соответственно).

Наконец, рассмотрим наиболее новаторский метод Астахова (Viktor P. Astakhov). Виктор Астахов — отечественный ученый, перебравшийся в 90-е за рубеж. Известными публикациями являются [23, 24].

Метод Астахова не имеет ничего общего с предыдущими вариантами, однако интересен своим инновационным подходом, не рассматриваемыми ранее соображениями на тему теоретического определения силы резания. Автор предполагает и подтверждает на практике, что сила резания имеет волновую зависимость от тепловой энергии и энергии деформации.

За основу берется следующее уравнение:

$$dW_{in} = dA + dQ,$$

где dW_{in} — внутренняя энергия; dA — механическая энергия, подаваемая извне; dQ — тепловая энергия, реализуемая в системе.

И рассматривается микрообъем обрабатываемого материала, расположенного в точке 2 на траектории инструмента (рис. 4), в момент, когда инструмент проходит эту точку. В соответствии с вышеуказанным уравнением, изменение внутренней энергии (dW_{in}) в микрообъеме равно сумме механической работе внешних сил (dA), приложенной инструментом, и остаточной тепловой энергии (dQ), проникающей в текущее положение из такого же объема, расположенного на соседней позиции траектории инструмента (из точки 1, см. рис. 4). Остаточная теплота dQ положительно, потому что эта теплота поступает в микрообъем в точке 2 (когда режущий инструмент достигает ее) из затухающего источника теплоты в точке 1 (предыдущей позиции инструмента) тогда и только тогда, когда скорость теплопроводности в заготовке равна или больше, чем скорость перемещения режущего инструмента в направлении подачи. То есть нет противоречия в законах термодинамики в уравнении энергии — сначала теплота входит в менее нагретую зону (точка 2, см. рис. 4), а затем инструмент (как источник теплоты) передвигается туда, таким образом, происходит выделение теплоты.

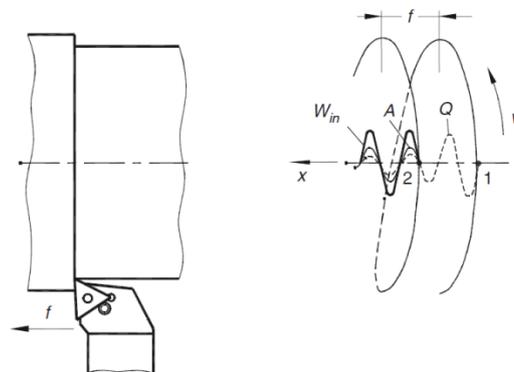


Рис. 4. Наружное точение и траектория движения инструмента

Астахов приводит экспериментальные данные. При точении стали AISI 4140 со скоростью от 4 до 345 м/мин диапазон силы резания составил:

при глубине резания $t = 0,1$ мм — 38...84 Н;

при глубине резания $t = 0,5$ мм — 169...328 Н;

при глубине резания $t = 1$ мм — 366...506 Н.

На основе этих данных представлена простая зависимость:

$$F_z = Cv^x.$$

Эта зависимость больше известна в другой записи:

$$F_z = Ct^x s^y v^n,$$

однако автор для простоты решил записать ее в ином виде.

Далее Астахов рассчитывает значение C по экспериментальным данным; значение степени x он выбирает по справочнику.

После подстановки значений получили:

$$F_z = 53,94v^{-0,1} \quad \text{при } t = 0,1 \text{ мм};$$

$$F_z = 193,13v^{-0,1} \quad \text{при } t = 0,5 \text{ мм};$$

$$F_z = 427,79v^{-0,1} \quad \text{при } t = 1 \text{ мм}.$$

Затем экспериментальные значения силы расположили в координатной системе « $v - P_z$ ».

С учетом вышеупомянутой волновой природы деформаций эти точки можно рассматривать как синусоидально периодические данные (рис. 5), которые могут быть представлены математически как волновая зависимость:

$$F_z = F_{z0} + F_{za} \sin \left[\frac{2\pi}{l_v} (v + v_{ph}) \right],$$

где F_{z0} — это синусоидальная функция; F_{za} , l_v и v_{ph} — амплитуда, длина волны и начальная фаза синусоиды соответственно.

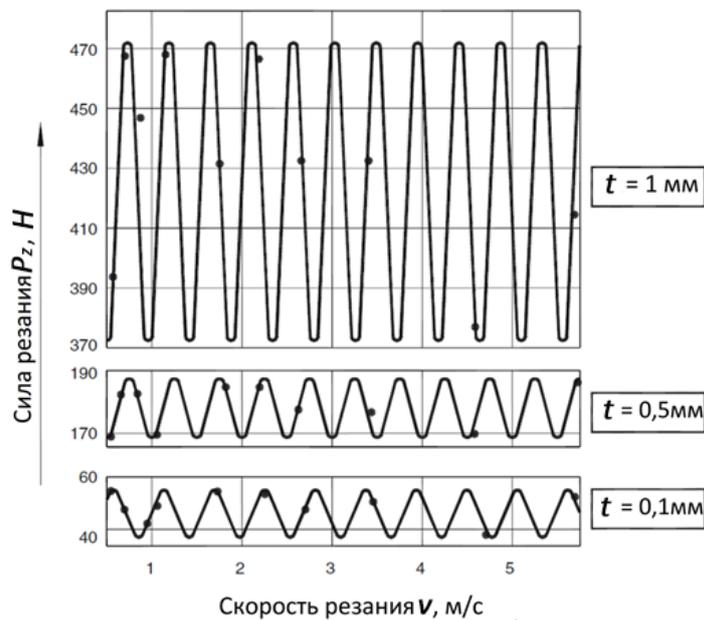


Рис. 5. Зависимость силы резания от скорости

В результате с учетом рис. 5 можно записать следующие выражения:

$$F_z = 47 + 10 \left[\frac{2\pi}{0,56} (0,050 + v) \right] \text{ при } t = 0,1 \text{ мм};$$

$$F_z = 178 + 11 \left[\frac{2\pi}{0,50} (0,049 + v) \right] \text{ при } t = 0,5 \text{ мм};$$

$$F_z = 422 + 50 \left[\frac{2\pi}{0,46} (0,045 + v) \right] \text{ при } t = 1 \text{ мм}.$$

Заметим, что при разных глубинах резания уравнения волн различаются, соответственно, различаются также значения амплитуд и длин волн.

Анализ указанных исследований позволяет утверждать, что отечественная и зарубежная школы теории резания имеют общие теоретические положения, получившие развитие и в настоящее время.

Установлено, что область применения ограничивается тем, что в теориях Мёрчанта, Клоке и Дэвима необходимо определить напряжение сдвига материала заготовки τ , угол трения μ и угол сдвига ϕ , что на производстве будет довольно трудоёмкой задачей. Кроме того, Мёрчант, как и Клоке, не учитывает износ инструмента и трение по задней поверхности. В энергетическом методе Дэвима износ учитывается, но остается неясным, как рассчитываются некоторые компоненты.

Несмотря на выявленные ограничения проанализированных теоретических положений, все упомянутые выше методы, безусловно, представляют большой интерес как для дальнейшего исследования и проработки, внедрения на практике, так и для расширения кругозора в области расчета сил резания.

Литература

- [1] Виноградов Д.В., Древаль А.Е., Васильев С.Г. Комплекс для оценки износостойкости материалов и сил резания при точении. *Инженерный вестник*, 2014, № 9. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/727928.html>
- [2] Древаль А.Е., Малькова Л.Д. Совместное влияние параметров механической обработки на величину составляющих силы резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2007, № 8, с. 53–61.
- [3] Древаль А.Е., Виноградов Д.В., Мальков О.В. Определение минимального диаметра концевой фрезы. *Наука и образование: научное издание*, 2015, № 11. URL: <http://engineering-science.ru/doc/827318.html>
- [4] Древаль А.Е., Васильев С.Г., Виноградов Д.В. и др. Контрольно-измерительный диагностический стенд для экспериментальных исследований в технологии механической обработки. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 12. URL: <http://engineering-science.ru/doc/749286.html>
- [5] Мальков О.В., Головкин И.М. Экспериментальное определение модели силы при резьбофрезеровании. *Инновации в машиностроении. Сб. тр. Межд. молодеж. конф.* Томск, Изд-во ТПУ, 2012, с. 73–77.
- [6] Мальков О.В., Карельский А.С. Моделирование срезаемого слоя при резьбофрезеровании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 9, с. 54–64. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-54-64 URL: <http://izvuzmash.ru/catalog/tpmachines/hidden/1463.html>
- [7] Малькова Л.Д. Энергосбережение при проектировании технологической операции токарной обработки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, спец. вып., с. 43–49.
- [8] Малькова Л.Д., Чихарева М.А. Исследование характеристик токарной обработки на основе получения и анализа многомерных полиномиальных зависимостей. *Наука и образование: научное издание*, 2013, № 8. URL: <http://engineering-science.ru/doc/589299.html>
- [9] Малькова Л.Д. Анализ применения дробных факторных планов в технологических исследованиях на примере механической обработки. *Наука и образование: научное издание*, 2016, № 10. URL: <http://engineering-science.ru/doc/847711.html>
- [10] Малькова Л.Д. Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей различными способами фрезерования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 12(60). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-12-1559 URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1559.html>
- [11] Мелкерис Т.В., Виноградов Д.В. Определение силы резания для криволинейного сечения срезаемого слоя. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 12. URL: <http://engineering-science.ru/doc/745856.html>
- [12] Шуляк Я.И., Васильев С.Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2016, № 1, с. 1–12.
- [13] Merchant M.E. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *Jour. Appl. Phys.*, 1945, vol. 16, no. 2, pp. 267–275.
- [14] Merchant M.E., Ernst H. Chip formation, friction and high quality machined surfaces, surface treatment of metals. *Surface treatment of metals*. Vol 29. ASM, 1941, pp. 299–378.
- [15] Merchant M.E. Basic mechanics of metal cutting process. *J. Appl. Mech.*, 1944, vol. 66, pp. 168–175.

- [16] Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М., Машгиз, 1956.
- [17] Зорев Н.Н. Расчет проекций силы резания. М., Машгиз, 1958.
- [18] Klocke F. Manufacturing processes 1. Cutting, 2011.
- [19] Klocke F. Manufacturing processes 2. Grinding, 2009.
- [20] Klocke F. Modeling and planning of manufacturing processes. Springer, 2007.
- [21] Davim J.P. Modern manufacturing engineering. Springer, 2015.
- [22] Davim J.P. Machining. Fundamentals and recent advances. Springer, 2008.
- [23] Astakhov V.P. Tribology of cutting tools. Elsevier Science, 2013.
- [24] [Astakhov V.P. Geometry of single-point turning tools and drills: fundamentals and practical applications. Springer, 2010.

Попов Николай Артемович — студент кафедры «Инструментальная техника и технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Малькова Людмила Дмитриевна, старший преподаватель, заместитель заведующего кафедрой «Инструментальная техника и технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**NUMERICAL SOLUTION OF DIFFERENTIAL EQUATIONS SYSTEM
OF TWO GRAVITATING BODIES BY THE EULER METHOD**

N.A. Popov

nickpopov1996@mail.ru

SPIN-code: 8735-5312

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper is concerned with a brief review and analysis of methods for the theoretical determination of cutting force developed in foreign scientific schools. The authors proposed the schemes for calculating the components of the cutting force, presented in the original publications, analytical models and fundamental approaches of the authors to the problem under consideration. In this paper the authors show analogies with domestic developments. The analysis based on the author's translation of English publications by specialist such as F. Klocke, M.E. Merchant, J.P. Davim and V.P. Astakhov, that representing fundamentally different approaches to determining the dynamic and energy characteristics of the cutting process.

Keywords

Metal cutting, cutting power, external turning, cutter, machining, chip formation, зона резания, cutting area, shear angle, tool wear

Received 06.11.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Vinogradov D.V., Dreval' A.E., Vasil'yev S.G. Complex for assessment of material wear-resistance and cutting forces at grinding. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2014, no. 9. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/727928.html> (in Russ.)
- [2] Dreval' A.E., Mal'kova L.D. Complex impact of mechanical treatment parameters on magnitude of cutting force components. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2007, no. 8, pp. 53–61 (in Russ.).
- [3] Dreval' A.E., Vinogradov D.V., Mal'kov O.V. Defining a minimum end mill diameter. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2015, no. 11. URL: <http://engineering-science.ru/doc/827318.html> (in Russ.)
- [4] Dreval' A.E., Vasil'yev S.G., Vinogradov D.V., et al. Measuring diagnostic stand for experimental researches in technology machining. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 12. URL: <http://engineering-science.ru/doc/749286.html> (in Russ.)
- [5] Mal'kov O.V., Golovko I.M. [Experimental definition of force model at thread grinding]. *Sb. tr. Mezhd. molodezh. konf.* [Proc. Int. Youth Conf.]. Tomsk, TPU Publ., 2012, pp. 73–77 (in Russ.).
- [6] Mal'kov O.V., Karel'skiy A.S. Modelling the cut layer when thread milling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], no. 9, pp. 54–64. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-54-64 URL: <http://izvuzmash.ru/catalog/tpmachines/hidden/1463.html> (in Russ.)
- [7] Mal'kova L.D. Power saving at engineering of turning technological process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, spec. iss., pp. 43–49 (in Russ.).

- [8] Mal'kova L.D., Chikhareva M.A. A study of lathing characteristics on the basis of obtaining and analyzing multidimensional polynomial dependences. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2013, no. 8. URL: <http://engineering-science.ru/doc/589299.html> (in Russ.)
- [9] Mal'kova L.D. Analiz primeneniya drobnykh faktornykh planov v tekhnologicheskikh issledovaniyakh na primere mekhanicheskoy obrabotki. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 10. URL: <http://engineering-science.ru/doc/847711.html> (in Russ.)
- [10] Mal'kova L.D. Estimating power consumption for flat surface machining employing various milling techniques. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2016, no. 12(60). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-12-1559 URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1559.html> (in Russ.)
- [11] Melkeris T.V., Vinogradov D.V. Determining a cutting force for curved section of cutting layer. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2014, no. 12. URL: <http://engineering-science.ru/doc/745856.html> (in Russ.)
- [12] Shulyak Ya.I., Vasil'yev S.G. A modernized UDM-600 dynamometer-based setup for the cutting force measurement. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2016, no. 1, pp. 1–12. (in Russ.)
- [13] Merchant M.E. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *Jour. Appl. Phys.*, 1945, vol. 16, no. 2, pp. 267–275.
- [14] Merchant M.E., Ernst H. Chip formation, friction and high quality machined surfaces, surface treatment of metals. *Surface treatment of metals*. Vol 29. ASM, 1941, pp. 299–378.
- [15] Merchant M.E. Basic mechanics of metal cutting process. *J. Appl. Mech.*, 1944, vol. 66, pp. 168–175.
- [16] Zorev N.N. Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov [Issues of metal cutting process mechanics]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. (in Russ.)
- [17] Zorev N.N. Raschet proektsiy sily rezaniya [Calculation of cutting forces projections]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958 (in Russ.).
- [18] Klocke F. Manufacturing processes 1. Cutting. Springer, 2011.
- [19] Klocke F. Manufacturing processes 2. Grinding, honing, lapping. Springer, 2009.
- [20] Klocke F. Modeling and planning of manufacturing processes. Springer, 2007.
- [21] Davim J.P. Modern manufacturing engineering. Springer, 2015.
- [22] Davim J.P. Machining. Fundamentals and recent advances. Springer, 2008.
- [23] Astakhov V.P. Tribology of cutting tools. Elsevier Science, 2013.
- [24] Astakhov V.P. Geometry of single-point turning tools and drills: fundamentals and practical applications. Springer, 2010.

Popov N.A. — Student, Department of Tool Engineering and Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — L.D. Malkova, Assist. Professor, Deputy Head of Department Tool Engineering and Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.