

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.923.9

Модель расчета силы резания для плоского шлифования на основании балансов скоростей и объемов снимаемого металла*

А.В. Акинцева, П.П. Переверзев

Южно-Уральский государственный университет

The cutting force calculation model for flat grinding based on the removed metal speed and volume balance

A.V. Akintseva, P.P. Pereverzev

South Ural State University

В автоматизированном машиностроении режимы резания до сих пор назначают вручную из-за отсутствия в САМ-системах модулей расчета оптимальных режимов резания и их тестирования на возможность обеспечения требований к чертежу. Это приводит к снижению производительности, повышению количества брака и себестоимости продукции. Одной из главных причин ухудшения этих параметров является отсутствие широкодиапазонной аналитической модели, устанавливающей взаимосвязь силы резания с режимами и условиями обработки. Предложена инженерная модель расчета силы резания, отражающая ее взаимосвязь не только с основными режимными технологическими параметрами, но и с параметрами микрорезания абразивных зерен шлифовального круга. Результатом исследования являются две независимые методики разработки широкодиапазонной аналитической модели расчета силы резания на примере плоского шлифования, которые устанавливают взаимосвязь силы резания с параметрами микрорезания зерен и режимами резания шлифовальным кругом в целом.

EDN: BRABGU

Ключевые слова: сила резания, плоское шлифование, микрорезание зерен, режим резания

Cutting modes in the automated mechanical engineering are still assigned manually due to the lack of modules in the CAM systems responsible for calculating the optimal cutting and testing modes to ensure satisfying the requirements of a drawing. As a result, production is facing a decrease in productivity and an increase in the number of defects and costs. One of the main reasons for deterioration in these parameters lies in the missing wide-range analytical model that establishes relationship between the cutting force and the machining modes and conditions. In this regard, design and development of a force model becomes an urgent task. The paper proposes an engineering model of the cutting force that reflects relationship between the cutting force and not only the main operation parameters, but also the abrasive grain micro-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00792.

cutting parameters of the grinding wheel. The research resulted in two independent methods in developing a wide-range analytical model to calculate the cutting force based on the example of surface grinding. These models are establishing the relationship between the cutting force and the grain micro-cutting parameters, as well as the wheel cutting modes in general.

EDN: BRABGU

Keywords: cutting force, flat grinding, grain micro-cutting, cutting mode

Точность, качество, производительность и себестоимость механической обработки напрямую зависят от режимов резания. На сегодняшний день режимы резания назначаются с помощью САМ-системы, которая базируется на нормативных данных, отражающих уровень производительности универсального оборудования 1960–1990-х годов. Это приводит к снижению производительности станков с числовым программным управлением и к использованию их технических возможностей в неполной мере.

В САМ-системе отсутствует цифровой инструмент для тестирования режимов резания на выполнение требований к чертежу, поэтому их необходимо адаптировать к реальным производственным условиям путем обработки пробных деталей. Это приводит к снижению производительности, повышению количества брака и себестоимости продукции.

Причиной возникновения такой производственной проблемы является отсутствие методического, математического и программного обеспечения для САМ-системы. Для ее решения необходимо разработать широкодиапазонную аналитическую инженерную модель расчета силы резания в зависимости от основных технологических факторов: режимов резания, параметров микрорезания абразивными зернами, свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрических характеристик зоны контакта режущего инструмента с заготовкой и кинематических особенностей процесса обработки.

Моделированию силы резания для различных видов шлифования посвящено большое количество работ. По характеру учета входящих параметров силовые модели подразделяют на вероятностные и детерминированные, по методике создания — на эмпирические и аналитические, по области применения — на информационные и оптимизационные.

Эмпирические силовые модели являются узкодиапазонными и не дают полного описания взаимовлияния между составляющими силы резания и параметрами процесса резания металла. Все это делает крайне ограниченным

применение эмпирических силовых моделей для практических целей машиностроения.

В научных публикациях описаны различные направления создания силовых моделей для операций шлифования. Так, в работах [1–3] установлена взаимосвязь между силой резания единичным зерном абразивного шлифовального круга (далее круг), физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и другими параметрами процесса резания через напряжения сдвига и сжатия.

В трудах [4–8] силовые модели отражают зависимость силы резания от процессов затупления, изнашивания, скалывания и вырывания абразивных зерен. Также разработаны силовые модели, учитывающие влияние динамических [9–11] и теплофизических [12, 13] свойств процесса резания на составляющие силы резания.

Несмотря на многообразие силовых моделей, все они имеют существенные недостатки, что объясняет отсутствие их повсеместного практического применения для нужд машиностроения.

Во-первых, модели не учитывают взаимосвязь силы и глубины резания при шлифовании кругом в целом и с параметрами микрорезания абразивными зернами. Чаще всего глубину и силу резания при обработке металла единичным абразивным зерном определяют при отсутствии достоверной априорной информации о количестве режущих зерен и снимаемых объемах металла. Такие силовые модели не отражают изменения глубины и силы резания на каждом ходе (обороте) круга, а также величину снимаемого припуска за время всей операции шлифования.

Во-вторых, силовые модели не учитывают объем металла, снимаемый совокупностью единичных абразивных зерен и кругом в целом. Расчет объема снимаемого металла при микрорезании не осуществляется, т. е. суммирование снятого металла не проводится и непонятно, когда закончится процесс снятия заданного объема металла.

В-третьих, в большей части силовых моделей нет учета влияния твердости круга на силу резания.

В-четвертых, силовые модели не отражают прямую зависимость между силой и режимами резания. За время съема припуска подача изменяется в десятки раз на различных ступенях подач, вследствие чего количество режущих зерен и глубина резания должны существенно уменьшаться. Однако это не учтено в существующих силовых моделях.

В-пятых, силовые модели не приведены к инженерному виду, что в значительной мере затрудняет их практическое применение.

Цель работы — установление зависимости на основании балансов скоростей и объемов снимаемого металла между силой резания, возникающей в процессе плоского шлифования (ПШ), и основными технологическим параметрами (режимами резания, параметрами инструмента, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и т. д.).

Рассмотрим методику разработки модели расчета тангенциальной составляющей силы резания, возникающей при ПШ. Выделим два подхода к установлению взаимосвязи параметров пластической деформации (ПД) металла в зоне сдвига при микрорезании абразивными зернами с макропараметрами режимов резания кругом в целом.

Первый подход построен на основании равенства объемов снимаемого металла совокупностью единичных абразивных зерен и кругом в целом на примере ПШ при соблюдении баланса мощности резания абразивными зернами и кругом в целом.

Второй подход основан на равенстве скоростей съема металла совокупностью абразивных

зерен и кругом в целом на примере ПШ при соблюдении баланса мощности резания абразивными зернами и кругом в целом.

Оба подхода базируются на энергетическом балансе при условии равной скорости съема металла совокупностью единичных зерен и кругом в целом. Важной особенностью, объединяющей подходы, является ограничение снимаемого объема металла заданным припуском на ПШ. Поэтому работа (энергия) имеет конечное значение в зависимости от объема снимаемого припуска.

Эта особенность также не учтена в перечисленных работах, там задана лишь постоянная глубина среза единичными зернами круга.

В основу обоих подходов положена математическая модель энергетических затрат на сдвиг металла в зоне стружкообразования при резании единичным зерном, имеющим площадку затупления размером l_j [1].

Согласно проведенным исследованиям [1], сдвиг металла (рис. 1, а) выполняет передняя грань абразивных зерен, имеющих отрицательный передний угол γ_3 . Форма зоны стружкообразования представляет собой узкую зону сдвига, которую можно описать параллелограммом $B_1BOO_1B_1^*B^*O^*O_1^*$. Основание параллелограмма расположено в плоскости сдвига, проходящей через режущую кромку зерна.

Схема резания стружки одним зерном круга [1] показана на рис. 1, б, где введены следующие обозначения: R — равнодействующая силы резания, Н; R_s — равнодействующая от силы пластического деформирования срезаемого слоя, Н; P_N — нормальная сила, Н; P_s —

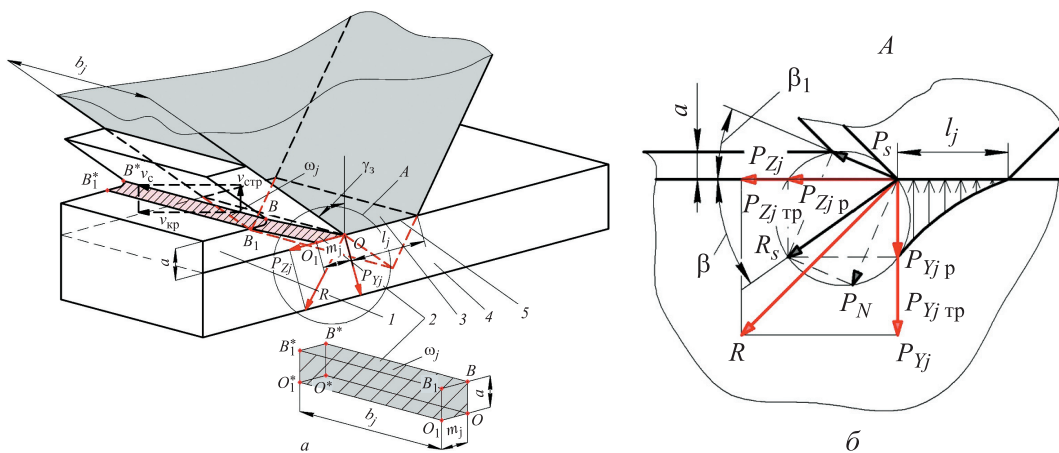


Рис. 1. Схемы идеализированного контакта единичного абразивного зерна с заготовкой (а) и сил резания, действующих на зерно (б):

1 — удаляемый слой металла; 2 — зона сдвига; 3 — острое единичное зерно; 4 — заготовка; 5 — площадка затупления зерна; v_c — скорость сдвига; $v_{чп}$ — скорость стружки

сила сдвига, Н; β — угол между линией среза и направлением равнодействующей силы, град; P_{YjP} — радиальная составляющая силы, возникающая от нормальных напряжений, Н; P_{YjTP} — радиальная составляющая силы, возникающая от напряжений, действующих по линии OB и вызывающих трение зерна о металл.

С учетом того, что глубина среза единичным зерном в десятки и даже сотни раз меньше размера площадки затупления, можно использовать схемы свободного резания и распределения плоских напряжений и деформации в зоне сдвига.

Основными источниками возникновения силы резания для всех видов механической обработки являются два процесса — резание металла путем ПД в зоне сдвига и трение по задней поверхности режущих кромок инструмента.

В работе [1] предложена формула для нахождения суммарной тангенциальной составляющей силы резания при обработке единичным абразивным зерном круга (рис. 1, б)

$$P_{Zj} = P_{ZjP} + P_{ZjTP}, \text{ Н,}$$

где j — порядковый номер зерна; P_{ZjP} — тангенциальная составляющая силы резания, возникающая при ПД металла в зоне сдвига, Н; P_{ZjTP} — тангенциальная составляющая силы резания, возникающая вследствие трения площадки затупления зерна об обрабатываемую поверхность, Н.

Учитывая сложность математического моделирования процессов при ПШ, введем следующие допущения:

$$P_{wZ} = P_{wZP} + P_{wZTP}; \quad (1)$$

$$P_{wZP} = \sum_1^p P_{ZjP}; \quad (2)$$

$$P_{wZTP} = \sum_1^p P_{ZjTP},$$

где P_{wZ} — суммарная тангенциальная составляющая силы резания, возникающая при шлифовании кругом в целом, Н; P_{wZP} — тангенциальная составляющая силы резания, возникающая при ПД металла в зоне сдвига, Н; P_{wZTP} — тангенциальная составляющая силы резания, возникающая вследствие трения площадки затупления зерна об обрабатываемую поверхность, Н; p — число зерен, находящихся в данный момент времени в зоне контакта круга с заготовкой.

Принимая за основу научные разработки С.Н. Корчака [1], можно установить теоретическую зависимость между силой, глубиной и режимами резания, характеристикой круга и другими основными технологическими параметрами.

Вывод аналитической модели расчета силы резания на основе первого подхода. Найдем мощность ПД металла в зоне сдвига от действия единичного зерна N_j через приращения элементарного объема металла ω_j и элементарного времени сдвига Δt , равного перемещению режущей кромки зерна из точки O в точку O_1 на расстояние m_j . (рис. 1).

По данным работы [1], при ПД металла справедливы следующие выражения:

$$A = \iiint_{\omega} \sigma \epsilon d\omega;$$

$$N = \frac{dA}{dt} = \iiint_{\omega} \sigma \dot{\epsilon} d\omega,$$

где A — работа, затрачиваемая на ПД объема металла ω , Дж; σ — интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла, Н/м²; ϵ — интенсивность ПД; N — мощность ПД объема металла в зоне сдвига ω , Вт; t — время ПД, с; $\dot{\epsilon}$ — интенсивность скорости ПД, с⁻¹.

Тогда мощность ПД объема металла в зоне сдвига ω_j (см. рис. 1)

$$N_j = \frac{dA}{dt} = \sigma \dot{\epsilon} \iiint_{\omega} \frac{d\omega_j}{dt} = \sigma \dot{\epsilon} \omega_j. \quad (3)$$

Здесь

$$\omega_j = \frac{amb_j}{\sin \beta_1},$$

где a — толщина среза единичным зерном, зависящая от расстояния между траекториями двух следующих друг за другом зерен, ширина среза которых перекрывается, м; b_j — длина режущей кромки единичного зерна, м; m — толщина зоны сдвига металла в области резания, м; β_1 — угол наклона условной плоскости сдвига, град.

Приравнивая мощность ПД объема металла в зоне сдвига от действия единичного зерна N_j к мощности внешних сил резания, определяемой через произведение тангенциальной составляющей силы резания P_{ZjP} , на скорость

резания единичным зерном (скорость круга) $v_{кр}$, м/с, запишем

$$N_j = \sigma \dot{\epsilon} \omega_j = P_{Zjp} v_{кр}.$$

После сдвига элементарный объем металла ω_j , который испытывает на себе ПД, относится к объему стружки и воспринимается как удаленный.

Объем металла, снимаемый всеми зернами круга на площади контакта, определяется выражением

$$\omega_{BL} = \frac{amb_j}{\sin \beta_1} N_{BL},$$

где N_{BL} — количество режущих зерен, расположенных в текущий момент времени по всей площади контакта круга с заготовкой, которая для ПШ находится как произведение ширины рабочей поверхности круга B , мм, на длину дуги контакта круга с заготовкой L , мм.

Количество режущих зерен, зависящее от характеристики абразивного инструмента, [14] вычисляется как

$$N_{BL} = \frac{W_3 W_{cb} k_{ysl}}{(1 - W_3 - W_{cb}) d_3^2} BL,$$

где W_3 и W_{cb} — относительное объемное содержание зерен и связки в круге соответственно; k_{ysl} — коэффициент, учитывающий условия ПШ; d_3 — средний размер зерен в круге.

Объем металла, равный снимаемой части припуска за один ход стола, определяется выражением

$$W_{пр} = \omega_{BL} \frac{L_{заг}}{v_{ст} \Delta t} = \frac{amb_j}{\sin \beta_1} N_{BL} \frac{L_{заг}}{v_{ст} \Delta t} = S_{zi} B L_{заг}, \quad (4)$$

где $L_{заг}$ — длина шлифуемой заготовки, мм; $v_{ст}$ — скорость перемещения стола станка, м/мин; S_{zi} — радиальная врезная подача, мм/ход.

Из формулы (4) находим объем металла, снимаемый всеми зернами на площади контакта:

$$\omega_{BL} = S_{zi} B v_{ст} \Delta t. \quad (5)$$

Общую мощность ПД при шлифовании кругом вычисляем по формуле

$$N_{кр} = \sum_1^p N_j = \sigma \dot{\epsilon} \omega_{BL} = P_{wZp} v_{кр}. \quad (6)$$

После подстановки выражения (5) в формулу (6) получаем

$$\sigma \dot{\epsilon} S_{zi} B v_{ст} \Delta t = P_{wZp} v_{кр}. \quad (7)$$

Выражая из уравнения (7) тангенциальную составляющую силы резания P_{wZp} и учитывая соотношение

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\Delta t}, \quad (8)$$

получаем

$$P_{wZp} = \frac{\sigma \epsilon S_{zi} B v_{ст}}{v_{кр}}. \quad (9)$$

Таким образом, из условия равенства объемов снимаемого металла совокупностью абразивных зерен и кругом в целом установлена зависимость (9), позволяющая определять тангенциальную составляющую силы резания при резании острым зерном.

Вывод аналитической модели расчета силы резания на основе второго подхода. Сдвиг объема металла ω_j происходит за время Δt прохождения вершиной единичного зерна расстояния OO_1 (рис. 2). Поэтому средняя интенсивность съема элементарного объема металла

$$\dot{Q}_j = \frac{\omega_j}{\Delta t}, \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (10)$$

Выражая объем металла ω_j из уравнения (10) и подставляя его в уравнение (3) с учетом того, что среднее значение интенсивности ПД можно найти по формуле (8), получаем

$$\sigma \epsilon \dot{Q}_j = P_{Zjp} v_{кр}.$$

В процессе ПШ одновременно участвует множество абразивных зерен. Поэтому для объемной схемы суммарная мощность ПД при одновременном резании зернами, находящимися в зоне контакта круга с деталью, имеет вид

$$N = \sum_1^p N_j = \sigma \epsilon \sum_1^p \dot{Q}_j = v_{кр} \sum_1^p P_{Zjp}. \quad (11)$$

Для дальнейшего преобразования уравнения (11) необходимо найти значения сумм элементарных интенсивностей съема металла на всей длине среза и для всех режущих зерен и соответствующих тангенциальных составляющих силы резания.

Интенсивность съема металла кругом равна сумме интенсивностей съема металла совокупностью режущих зерен. Схема среза металла кругом при ПШ приведена на рис. 2. Металл срезают единичные зерна с суммарной (условной) длиной активных режущих кромок b (которая численно равна суммарной ширине зоны

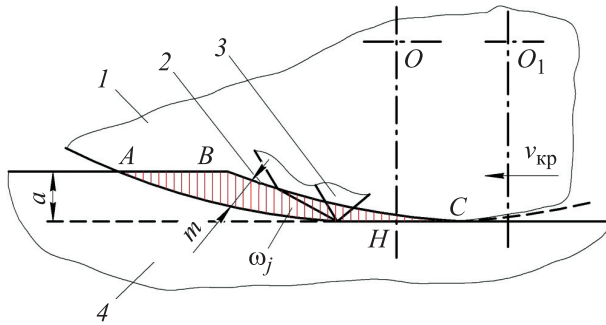


Рис. 2. Схема среза металла кругом при ПШ:
1 — круг; 2 — траектория вершины предыдущего зерна;
3 — режущее зерно; 4 — заготовка

сдвига для круга), расположенных в зоне контакта круга (по его образующим) с заготовкой.

Каждое зерно круга срезает объем металла, равный сумме сдвигаемых объемов металла ω_j на всей длине среза AHC ,

$$U_j = \sum_1^x \omega_j = \sum_1^x \left(\frac{am}{\sin \beta_1} b_j \right),$$

где x — число сдвигаемых объемов металла ω_j , уместающихся на всей длине среза AHC .

Срезаемый объем металла также можно определить по выражению

$$U_j = \Phi_j b_j, \quad (12)$$

где Φ_j — площадь боковой поверхности $ABCH$ снимаемого металла при резании единичным зерном, m^3 .

Важной особенностью процесса ПШ является боковое перекрытие следов зерен, вследствие чего они работают не по всей длине режущей кромки. Поэтому при срезании объемов металла U_j каждым режущим зерном круга будем считать, что величина b_j , входящая в состав уравнения (12), представляет собой длину активной рабочей части режущей кромки каждого режущего зерна.

Интенсивность съема металла кругом в целом зависит от объема металла, срезанного им за один оборот с учетом числа оборотов круга в единицу времени. Поэтому объем металла, снимаемого кругом за один оборот, определяется выражением

$$Q_{кр} = \sum_1^q \sum_1^x \omega_j, \quad m^3/об, \quad (13)$$

где q — число режущих зерен на рабочей поверхности круга.

Уравнение (13) представляет собой сумму элементарных объемов металла, претерпеваю-

щих ПД сдвига в зоне стружкообразования за один оборот круга.

В этом случае общая интенсивность съема металла кругом

$$\dot{Q} = Q_{кр} n_{кр} = n_{кр} \sum_1^q \sum_1^x \omega_j, \quad m^3/c, \quad (14)$$

где $n_{кр}$ — частота вращения круга, c^{-1} .

Выражая интенсивность съема металла из уравнения (11) и приравнявая полученную формулу к уравнению (14), получаем баланс мощностей, предложенный С.Н. Корчаком [1], который для операций шлифования определяется выражением

$$\sigma \epsilon \dot{Q} = v_{кр} \sum_1^p P_{Zjp}. \quad (15)$$

Для операций ПШ интенсивность съема металла кругом можно выразить через ширину его рабочей поверхности и параметры режима резания следующим образом:

$$\dot{Q} = S_{zi} B v_{ст}.$$

Тогда с учетом уравнения (2) выражение (15) принимает вид

$$P_{wZp} = \frac{\sigma \epsilon S_{zi} B v_{ст}}{v_{кр}}. \quad (16)$$

Идентичность выражений (16) и (9), применяемых для нахождения силы резания, свидетельствует о том, что описанные допущения полностью отражены в обоих подходах. Оба подхода основаны на энергетическом балансе с ограничениями по скорости съема металла и объемам снимаемого металла.

Составим конечное уравнение для определения тангенциальной составляющей силы резания, воспользовавшись формулой (1). Первую тангенциальную составляющую силы резания, затрачиваемую на резание металла, P_{Zp} можно найти по идентичным формулам (16) и (9).

Вторая структурная составляющая тангенциальной силы резания, затрачиваемая на трение металла по задней поверхности, имеет вид [1]

$$P_{Zтр} = \mu \frac{\sigma}{3} F. \quad (17)$$

Здесь μ — коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу; F — суммарная площадь площадок затупления режущих зерен круга, находящихся в данный момент времени в зоне контакта, mm^2 ,

$$F = BL\eta = \eta BL\sqrt{DS_{zi}}, \quad (18)$$

где η — степень затупления круга; D — диаметр круга, мм.

Преобразуя уравнение (2) с учетом выражений (9), (17) и (18), получаем

$$P_{wz} = \frac{\sigma \varepsilon S_{zi} B v_{ст}}{v_{кр}} + \frac{\mu \eta \sigma B}{3} \sqrt{DS_{zi}}. \quad (19)$$

Выражение (19) позволяет найти тангенциальную составляющую силы резания, возникающую в процессе ПШ, и устанавливает взаимосвязь между режимами резания (скоростями круга и стола, радиальной врезной подачей), физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и типоразмером круга. Однако выражение (19) не учитывает процесс затупления абразивных зерен.

Модели расчета силы резания, полученные на основе энергетического баланса и применения двух подходов с ограничениями по объему снимаемого металла и скорости съема, являются одинаковыми и состоят из двух слагаемых — сил резания, возникающих в зоне сдвига металла и на площадке затупления зерен [1]. Совпадение силовых моделей, созданных на основе разных подходов, подтверждает их достоверность.

В статье [15] приведен более подробный и детальный вывод модели силы резания, возникающей в процессе ПШ, полученной с помощью второго подхода.

Следует отметить, что на основании равенства скоростей съема металлов (15), а также с учетом кинематических особенностей съема металла получены модели силы резания для различных видов абразивной обработки [16–18]. Эти модели подтверждены экспериментальными данными, что доказывает их адекватность.

Разработанные на основе выражения (15) аналитические модели расчета силы резания для различных видов шлифования дают высокую точность расчетов, находящуюся в пределах $\pm 15\%$.

Выводы

1. Предложены два подхода, основанные на энергетическом балансе с ограничениями по объему снимаемого металла и скорости съема и позволяющие разрабатывать адекватные модели расчета силы резания для разных операций механической обработки.

2. Совпадение моделей расчета силы резания, полученных на основе двух подходов, свидетельствует об их достоверности.

3. Модели расчета силы резания включают в себя две составляющие силы резания, возникающие в зоне сдвига металла и на площадке затупления зерен при их внедрении в металл и вследствие трения по задней поверхности абразивных зерен.

4. Предложенная аналитическая модель расчета силы резания независимо от принятого подхода устанавливает ее взаимосвязь с глубиной резания, параметрами микрорезания, твердостью, зернистостью и связкой круга, свойствами материала детали, геометрическими характеристиками зоны контакта круга и заготовки, параметрами режима резания, степенью затупления круга и другими основными технологическими параметрами.

5. Адекватность двух методик моделирования силы резания доказана экспериментальным путем на примере различных видов шлифования, где относительная погрешность расчетов составила $\pm 15\%$.

Литература

- [1] Корчак С.Н. *Производительность процесса шлифования*. Москва, Машиностроение, 1974. 280 с.
- [2] Николаенко А.А. Моделирование обеспечения точности обработки при плоском глубинном шлифовании периферией круга. *Технология машиностроения*, 2011, № 5, с. 57–59.
- [3] Кошин А.А., Шипулин Л.В. Стохастические модели температурных и силовых явлений, происходящих при шлифовании, и их реализация средствами параллельных вычислений. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Математическое моделирование и программирование*, 2012, № 12, с. 20–31.
- [4] Новоселов Ю.К. *Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке*. Севастополь, Изд-во СевНТУ, 2012. 304 с.
- [5] Носенко В.А., Носенко С.В. *Технология шлифования металлов*. Старый Оскол, ТНТ, 2019. 616 с.

- [6] Лоладзе Т.Н. Силы резания при шлифовании металлов. *Металлообработка*, 2002, № 1, с. 3–8.
- [7] Мишин В.Н., Балашов В.Н. Силы, возникающие при шлифовании, *Автомобильная промышленность*, 2010, № 10, с. 26–28.
- [8] Durgumahanti U., Singh V., Rao P. A new model for grinding force prediction and analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 231–240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.12.004>
- [9] Воронов С.А., Вэйдун М.А. Математическое моделирование процесса плоского шлифования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2017, № 4, с. 85–94.
- [10] Братан С.М., Часовитина А.С. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2023, т. 25, № 1, с. 57–70, doi: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70>
- [11] Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process. *J. Sound Vib.*, 2005, vol. 280, no. 1–2, pp. 425–432, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.12.006>
- [12] Дьяконов А.А. Стохастический подход к решению теплофизических и силовых задач теории шлифования. *Металлообработка*, 2008, № 2, с. 2–6.
- [13] Ramachandran D., Vijayaraghavan L. Theoretical analysis of thermal profile and heat transfer in grinding. *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 21–23.
- [14] Курдюков В.И. *Основы абразивной обработки*. Курган, Изд-во КГУ, 2014. 195 с.
- [15] Акинцева А.В., Переверзев П.П. Аналитическая модель силы резания, возникающая в процессе плоского шлифования. *Машиностроительные технологические системы. Сб. тр. межд. конф. ДГТУ*, 2022, с. 232–238.
- [16] Yudin S., Pereverzev P., Reshetnikov B. Analytical modeling of cutting forces and technological parameters interrelation when grinding shafts' ends by a grinding wheel end on circular grinding machines. *Mater. Sci. Forum*, 2021, vol. 1037, pp. 377–383, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.377>
- [17] Almawash A., Pereverzev P. Model of machining error for the circular external plunge grinding taking into account the dynamic features of process. In: ICIE 2021. *Springer*, 2022, pp. 129–136, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_16
- [18] Переверзев П.П., Альсигар М.К. Моделирование взаимосвязи силы резания с основными технологическими факторами при круглом шлифовании с продольной подачей. *Современные фундаментальные и прикладные исследования*, 2017, № 4–1, с. 38–44.

References

- [1] Korchak S.N. *Proizvoditelnost protsessy shlifovaniya* [Productivity of grinding process]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 280 p. (In Russ.).
- [2] Nikolaenko A.A. Modelling of machining accuracy in flat depth grinding with wheel periphery. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 5, pp. 57–59. (In Russ.).
- [3] Koshin A.A., Shipulin L.V. Temperature and force stochastic models in grinding processes and implementation of them by parallel computing. *Vestnik YuUrGU. Ser. Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming and Computer Software], 2012, no. 12, pp. 20–31. (In Russ.).
- [4] Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [Dynamics of surface shaping during abrasive machining]. Sevastopol, Izd-vo SevNTU Publ., 2012. 304 p. (In Russ.).
- [5] Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Technology of metal grinding]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2019. 616 p. (In Russ.).
- [6] Loladze T.N. Cutting forces in process of metal grinding. *MetallООbrabotka*, 2002, no. 1, pp. 3–8. (In Russ.).
- [7] Mishin V.N., Balashov V.N. Forces are given at grinding, *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2010, no. 10, pp. 26–28. (In Russ.).
- [8] Durgumahanti U., Singh V., Rao P. A new model for grinding force prediction and analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 231–240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.12.004>

- [9] Voronov S.A., Veydun M.A. Mathematical modeling of the cylindrical grinding process. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2017, no. 4, pp. 85–94. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2017, vol. 46, no. 4, pp. 394–403, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618817030177>)
- [10] Bratan S.M., Chasovitina A.S. Simulation of the relationship between input factors and output indicators of the internal grinding process, considering the mutual vibrations of the tool and the workpiece. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science], 2023, vol. 25, no. 1, pp. 57–70, doi: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70> (in Russ.).
- [11] Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process. *J. Sound Vib.*, 2005, vol. 280, no. 1–2, pp. 425–432, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.12.006>
- [12] Dyakonov A.A. Occasional approach to deciding the thermal-physical and the intensity task of the grinding theory. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2008, no. 2, pp. 2–6. (In Russ.).
- [13] Ramachandran D., Vijayaraghavan L. Theoretical analysis of thermal profile and heat transfer in grinding. *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 21–23.
- [14] Kurdyukov V.I. *Osnovy abrazivnoy obrabotki* [Fundamentals of abrasion]. Kurgan, Izd-vo KGU Publ., 2014. 195 p. (In Russ.).
- [15] Akintseva A.V., Pereverzev P.P. [Analytical model of the cutting force generated in the process of surface grinding]. *Mashinostroitelnye tekhnologicheskie sistemy. Sb. tr. mezhd. konf. DGTU* [Machine-Building Technological Systems. Proc. Int. Conf. DGTU], 2022, pp. 232–238. (In Russ.).
- [16] Yudin S., Pereverzev P., Reshetnikov B. Analytical modeling of cutting forces and technological parameters interrelation when grinding shafts' ends by a grinding wheel end on circular grinding machines. *Mater. Sci. Forum*, 2021, vol. 1037, pp. 377–383, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.377>
- [17] Almawash A., Pereverzev P. Model of machining error for the circular external plunge grinding taking into account the dynamic features of process. In: ICIE 2021. *Springer*, 2022, pp. 129–136, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_16
- [18] Pereverzev P.P., Alsigar M.K. Modeling the relationship between the cutting force and the main technological factors for cylindrical external grinding with longitudinal feeding. *Sovremennye fundamentalnye i prikladnye issledovaniya* [Modern Basic and Applied Research], 2017, no. 4–1, pp. 38–44. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.08.2023

Информация об авторах

АКИНЦЕВА Александра Викторовна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техники, технологии и строительства. Институт открытого и дистанционного образования Южно-Уральского государственного университета (454000, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: akintsevaav@susu.ru).

ПЕРЕВЕРЗЕВ Павел Петрович — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология автоматизированного машиностроения». Институт открытого и дистанционного образования Южно-Уральского государственного университета (454000, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: pereverzevpp@susu.ru).

Information about the authors

AKINTSEVA Aleksandra Viktorovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Engineering, Technology and Construction. South Ural State University (454000, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: akintsevaav@susu.ru).

PEREVERZEV Pavel Petrovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of Department of Automated Engineering Technology. South Ural State University (454000, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: pereverzevpp@susu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Акинцева А.В., Переверзев П.П. Модель расчета силы резания для плоского шлифования на основании балансов скоростей и объемов снимаемого металла. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 2, с. 35–43.

Please cite this article in English as:

Akintseva A.V., Pereverzev P.P. The cutting force calculation model for flat grinding based on the removed metal speed and volume balance. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 2, pp. 35–43.