

УДК 621.7

<https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-19-52-58>

## НЕЙРОННОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ

*Кабалдин Ю.Г., Башков А.А., Иванов С.В., Замураев И.Д.*

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Нижний Новгород*

**Ключевые слова:** процесс резания, коэффициент трения, искусственная нейронная сеть, машинное обучение, цифровой двойник.

**Аннотация.** Проведено моделирование процесса трения при резании на основе искусственной нейронной сети (ИНС) и машинного обучения. Показано, что разработанные нейросетевые модели (цифровые двойники) трения при токарной обработке пригодны для их использования как в исследованиях, так и на практике, и имеют высокую точность. Трение существенно определяет износ режущего инструмента, шероховатость обработанной поверхности и вибрации при резании. Поэтому трение при резании представляет фундаментальную проблему. Однако определение коэффициента трения при резании требует значительного времени и оборудования. В настоящее время процессы трения и изнашивания инструмента при резании рассматриваются с позиции термодинамики открытых систем. В этой связи, в трибосистемах происходит накопление и рассеивание  $\Delta U_d$  энергии упругой деформации и  $Q$  тепла. *Цель работы* – разработать нейронносетевую модель процесса трения при резании и оценить адекватность предлагаемой модели. *Задачи* – определить параметры, оказывающие наибольшее влияние на коэффициент трения, составить структуру нейронной сети; обучить ИНС на полученных данных; сравнить точности прогнозирования при различных методах обучения.

## NEURAL NETWORK MODELING OF FRICTION PROCESSES DURING CUTTING

*Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A., Ivanov S.V., Zamuraev I.D.*

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod*

**Keywords:** cutting process, coefficient of friction, artificial neural network, machine learning, digital twin.

**Abstract.** The modeling of the friction process during cutting based on an artificial neural network (INS) and machine learning is carried out. It is shown that the developed neural network models (digital twins) of friction during turning are suitable for their use both in research and in practice and have high accuracy. Friction significantly determines the wear of the cutting tool, the roughness of the treated surface and vibrations during cutting. Therefore, friction during cutting is a fundamental problem. Currently, the processes of friction and tool wear during cutting are considered from the standpoint of thermodynamics of open systems. In this connection, the accumulation and dispersion of the elastic deformation energy  $\Delta U_d$  and heat  $Q$  occurs in tribosystems. *The purpose of the work* is to develop a neural network model of the friction process during cutting and to assess the adequacy of the proposed model. *The tasks* are to determine the parameters that have the greatest impact on the coefficient of friction, to make up the structure of the neural network; train the INS on the received data; compare prediction accuracy with different training methods.

### Введение

Трение играет определяющую роль в процессе износа и затупления режущего инструмента, а также формировании шероховатости обработанной поверхности. В настоящее время нет единой точки зрения на природу возникновения трения при резании [1-3], поэтому изучение процессов трения при резании является актуальной проблемой. Сегодня ее можно изучать с применением современных методов, подходов и инструментов.

Изучению механизмов трения при резании посвящены работы [1-6,8,9,10]. На процесс трения влияет большое число факторов. Кроме того, имеет место взаимовлияние этих факторов. ИНС является современным инструментом для обработки большого числа данных, нахождения внутренних связей и закономерностей и прогнозирования, позволяющего с высокой точностью моделировать различные процессы в нетипичных условиях.

Уравнение (1) основывается на первом и втором законах термодинамики.

$$A_T = \Delta U_d + Q, \quad (1)$$

где  $A_T$  – работа трения;  $\Delta U_d$  – энергия упругой деформации;  $Q$  – тепло.

При этом полагается, что сила трения  $F$ , интенсивность изнашивания будут определяться видами диссипативных (вторичных) структур, формирующихся в поверхностном (приконтактном) слое. Однако теория диссипативных структур не позволяет охватить весь круг вопросов такого сложного явления, как процессы трения при резании. Достаточно сказать, что на трение при резании оказывает влияние скорость резания  $V$ , толщина среза  $a$ , передний угол инструмента  $\gamma$  и т.д.

В этой связи, в настоящей статье с целью прогнозирования коэффициента трения при резании в зависимости от условий обработки проведено моделирование процесса трения при резании на основе искусственной нейронной сети (ИНС) и машинного обучения [7].

Коэффициент трения при резании обычно определяется как частное от деления силы трения на силу нормального давления:

$$\mu = tg\eta = \frac{F}{N}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – угол трения;  $F$  – сила трения;  $N$  – сила нормального давления.

В действительности, вследствие того, что в различных точках площади контакта между стружкой и передней поверхностью инструмента условия контакта сильно различаются, из соотношения  $\frac{F}{N}$  определяется значение коэффициента трения при резании, некоторое среднее между коэффициентом сухого механического трения и коэффициентом трения в зоне пластического контакта. Так как в процессе резания сила трения  $F$  и нормальная сила  $N$  находятся в сложной взаимозависимости и изменяются одновременно, то для определения коэффициента трения каждый раз необходимо определять эти обе силы.

При свободном резании равнодействующая всех сил на резце  $R_o$  направлена в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке, поэтому коэффициент трения выражается геометрической зависимостью:

$$\mu = \frac{F}{N} = tg\eta = tg(\omega + \gamma), \quad (3)$$

где  $\omega$  – угол направления равнодействующей сил на передней грани резца относительно линии;  $\gamma$  – передний угол режущего инструмента:

$$tg\omega = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_x - N_1}{P_z - F_1}, \quad (3.1)$$

где  $P_x, P_z$  – силы резания;  $F_1$  – сила трения;  $N_1$  – сила нормального давления.

Откуда угол трения:

$$\eta = \omega + \gamma. \quad (3.2)$$

Согласно [1], коэффициент трения при резании можно также определить из соотношения:

$$\mu = \frac{q_F}{q_N} = \frac{const}{q_N}, \quad (4)$$

где  $q_F$  – удельная сила трения;  $q_N$  – удельное давление на передней поверхности инструмента.

Параметры  $q_N$  и  $q_F$  являются самостоятельными контактными характеристиками, зависящими от разных факторов: удельная сила трения является суммой силы пластического сдвига в контактном слое, а среднее контактное давление есть функция относительной длины контакта  $C/a$ .

На рисунке 1 представлена схема, иллюстрирующая двухзонную модель трения стружки с передней поверхностью инструмента [1]. В этой связи, различают  $C_{nn}$  длину пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента и  $C_e$  длину контакта, где реализуется внешнее трение стружки с инструментом.

Для одного обрабатываемого материала удельная  $q_F$  сила трения постоянна (инвариантна к условиям резания), поэтому коэффициент трения зависит только от среднего

контактного давления. Инвариантность  $q_F$  к условиям резания связывается с достижением металла в прирезцовых слоях стружки предельной степени деформации [1-3].

В связи с инвариантностью силы  $q_F$  все внешние действующие при резании параметры (скорость резания, подача, передний угол и т.д.) будут влиять на коэффициент трения лишь постольку, поскольку они изменяют длину  $c$  контакта стружки с передней поверхностью инструмента, а, следовательно, среднее контактное давление  $q_N$ . Однако для разных обрабатываемых материалов средний коэффициент трения зависит от удельной силы трения, что и обуславливает существование отдельной кривой  $\mu = f(q_N)$  для каждого материала [1].

Установлена связь силы  $q_F$  с действительным сопротивлением разрыву обрабатываемых материалов  $S_k$  [3]:

$$q_F = 0,28 \cdot S_k, \quad (5)$$

$$q_N = \frac{N}{a \cdot b}, \quad (6)$$

где  $a$  – толщина среза;  $b$  – ширина среза.

Поэтому коэффициент трения можно представить в виде:

$$\mu = \frac{0,28 \cdot S_k \cdot a \cdot b}{N}. \quad (7)$$

Как видно из изложенного выше, важнейшей характеристикой контактных процессов и трения при резании является длина  $C$  контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Согласно [1,3], относительная длина  $C/a$  зависит также и от коэффициента усадки стружки –  $K_a$  в широком изменении свойств обрабатываемых материалов.

Исследования [1-3] показывают, что силы на задних гранях острых резцов относительно малы, поэтому при расчете коэффициента трения на передней грани они могут оказать заметное влияние лишь при очень тонких срезах, а при толщине среза больше 0,15 мм могут не приниматься во внимание.

При резании сталей с толщиной среза больше 0,15-0,2 мм, а при резании чугуна – больше 0,35 мм силы на задней грани становятся совершенно несущественными и при расчете силы  $P_z$  для работы острым инструментом ими можно пренебрегать [1]. Наоборот, при уменьшении толщины среза доля сил на задней грани в общей картине сил резания становится тем более заметной, чем меньше толщина среза, и при очень малых величинах толщины среза силы на задней грани могут быть больше сил на передней грани. Такое положение может иметь место при тонком точении, тонком фрезеровании, работе разверток, протяжек, фасонного инструмента.

В работе [1] предложена методика определения сил резания на задней поверхности инструмента путем экстраполяции сил резания на нулевую толщину среза. Их оценка позволила получать значения коэффициента трения в зависимости от условий резания.

На основе анализа параметров, влияющих на средний коэффициент трения при резании (формула 7), рассмотренных выше, разработана структура нейронной сети.

### Разработка структуры нейронной сети

Как указывалось выше, на коэффициент трения влияет большое число факторов такие как: скорость резания ( $V$ ), подача ( $S$ ), глубина резания ( $t$ ), передний угол ( $\gamma$ ), действительный предел прочности ( $S_\sigma$ ), СОЖ, вибрации, покрытия и др.

Учесть все параметры сложно, т.к. это требует большего количества экспериментов и специального оборудования. Поэтому на вход в нейронную сеть мы ограничили количество влияющих на коэффициент трения параметров, рассматриваемых для ее обучения.

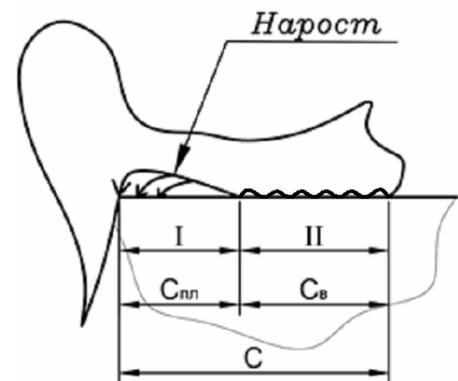


Рис. 1. Двухзонная модель трения при резании

На рисунке 2 показана ИНС для моделирования и машинного обучения, прогнозирующая коэффициент трения при токарной обработке углеродистой стали 45, в зависимости от режимов резания. По результатам моделирования построены графики сравнения точности машинного обучения и нейронной сети с экспериментальными данными. Проведена также проверка работы цифрового двойника трения по параметрам, отличающихся от тех, на которых он обучался.

Спроектированная ИНС для моделирования и машинного обучения позволяет прогнозировать коэффициент трения при токарной обработке углеродистой стали в зависимости от режимов резания. Ниже показаны зависимости коэффициента трения от скорости резания и подачи.

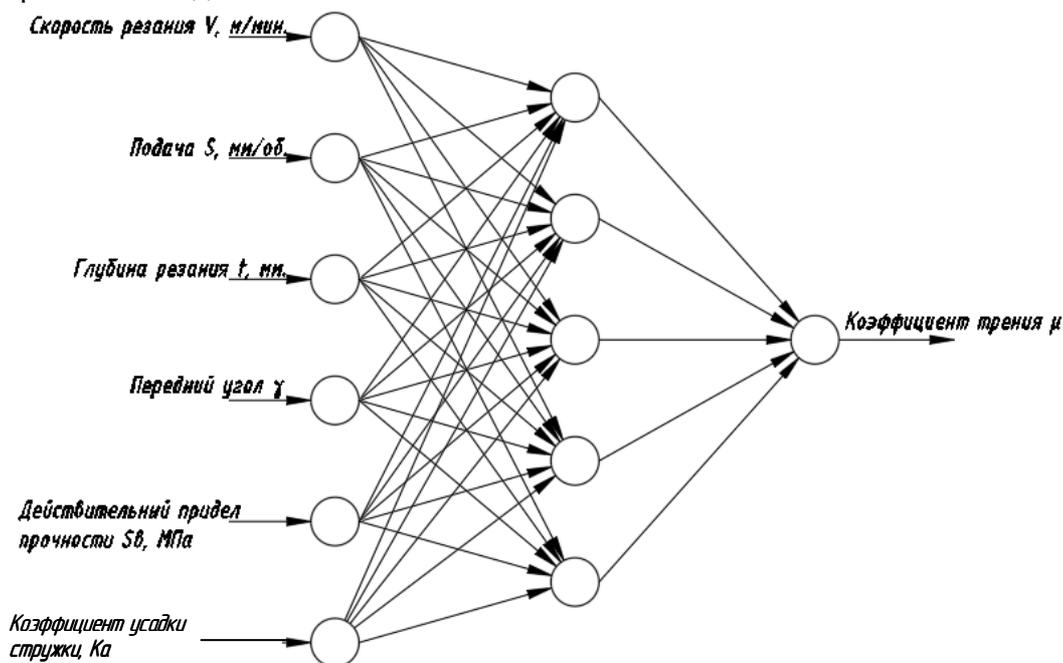


Рис. 2. Искусственная нейронная сеть процесса трения прямого распространения

### Получение экспериментальных данных и обучение сети

При разработке цифровой модели трения при токарной обработке, выбрана рекуррентная ИНС с сигмоидальной функцией активации нейронов. Для этого построили графики зависимости коэффициента трения от скорости резания, подачи и переднего угла.

В качестве обучающей выборки использованы данные, полученные в процессе наших экспериментальных исследований и данных [1]. Экспериментальные данные, полученные в ходе эксперимента, заносились в таблицу (excel) и затем экспортировались в Matlab.

При обучении использовался алгоритм обратного распространения ошибки. По окончании процесса обучения проводилась верификация полученной модели на основе значений средней квадратичной ошибки.

На рисунках 3-6 показаны зависимости коэффициента трения от скорости резания и разных подачах.

На рисунке 4 показана зависимость коэффициента трения от скорости резания при подаче  $S = 0,2$  мм/об.

Анализ рисунков 3 и 4 показывает, что зависимости носят немонотонный характер. С ростом подачи коэффициент трения увеличивается. Следует также отметить, что как при машинном обучении, так и при нейронносетевом моделировании, построенные зависимости имеют одинаковый характер.

На рисунке 5 представлены зависимости коэффициента трения от подачи. Видно, что зависимости коэффициента трения от подачи имеют иной характер, в частности, наблюдается максимум при подаче 0,11 мм/об. Так же, как и от скорости резания при различных подачах, указанные зависимости имеют одинаковый (экстремальный) характер как при нейронносетевом моделировании, так и при машинном обучении.

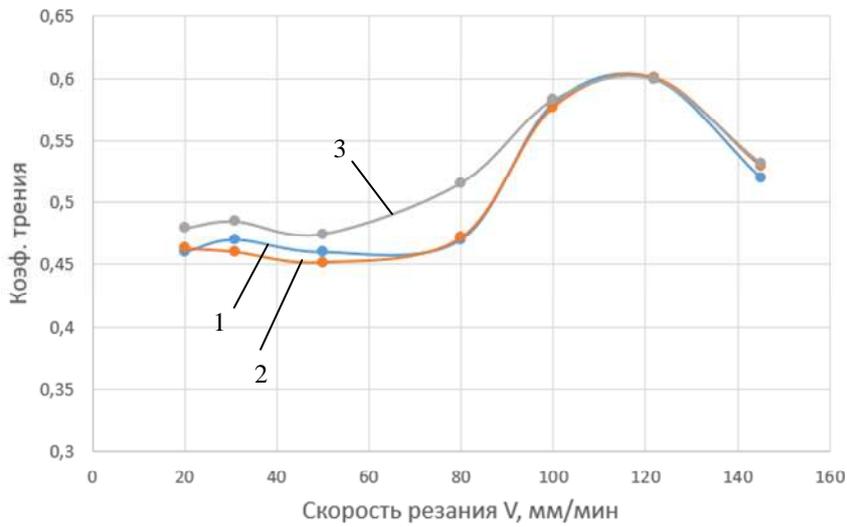


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента трения от скорости резания при подаче  $S = 0,1$  мм/об: 1 – экспериментальные данные, 2 – данные цифрового двойника, 3 – данные машинного обучения

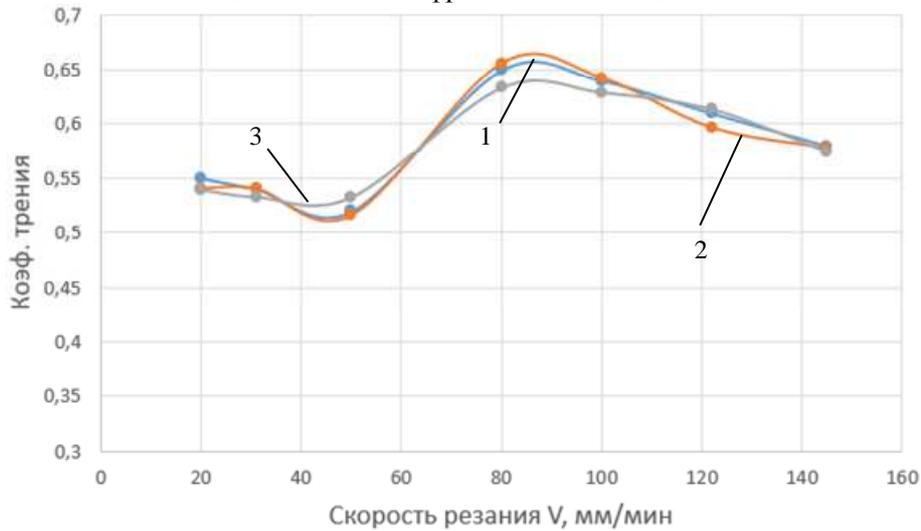


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента трения от скорости резания при подаче  $S = 0,2$  мм/об: 1 – экспериментальные данные, 2 – данные цифрового двойника, 3 – данные машинного обучения

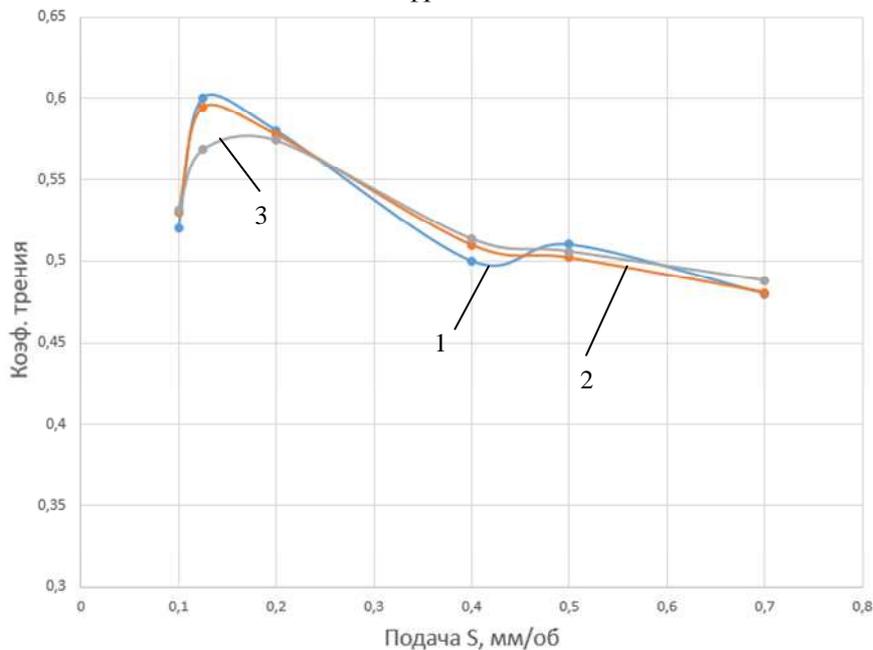


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента трения от подачи при скорости резания  $V = 145$  м/мин: 1 – экспериментальные данные, 2 – данные цифрового двойника, 3 – данные машинного обучения

В таблице 1 представлены результаты расчета погрешности прогнозирования коэффициента трения различными методами обучения.

Как следует из таблицы 1, точность цифрового двойника на основе нейронной сети получилась выше, так как данный способ использует сложные алгоритмы и закономерности, которые увеличивают число итераций и тем самым точность нейронной сети по сравнению с машинным обучением.

Табл. 1. Результаты погрешности прогнозирования коэффициента трения

Метод обучения	Алгоритм обучения	Погрешность прогнозирования
Машинное обучение	Метод опорных векторов (QuadraticSVM)	MSE = 0,38
На основе нейронной сети	Левенберга-Марквардта (Levenderg-Marquardt) 100 нейронов в скрытом слое	MSE = 0,09

### Проверка работы цифрового двойника процессов трения при резании

Программный продукт *MatLab* предлагает большой набор инструментов и функций для работы с нейронными сетями, а также имеет возможности экспорта нейронной сети в код, экспорта полученной модели в другие форматы и т.д.

Далее использовали полученный цифровой двойник трения при токарной обработке углеродистой стали 45 для определения коэффициента трения по параметрам, отличающихся от тех, на которых он обучался. Результаты работы представлены на рисунке 6.

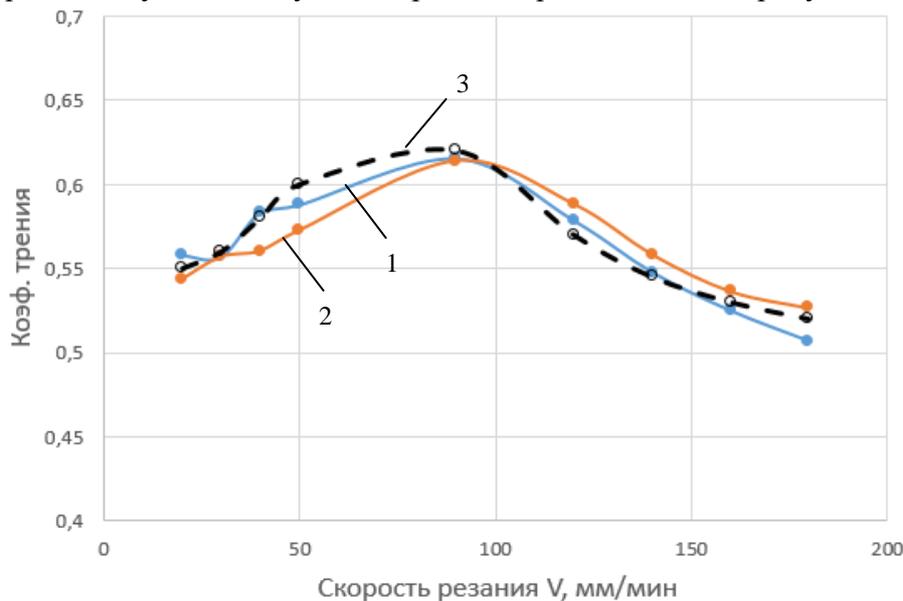


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от скорости трения,  $S=0,285$  мм/об: 1 – данные цифрового двойника, 2 – данные машинного обучения, 3 – теоретические значения по Н.Н. Зореву [1]

Анализ рисунка 6 показывает, что полученный цифровой двойник трения при токарной обработке углеродистой стали 45 работает адекватно (по точности схож с теоретической зависимостью, рассчитанной по формуле Зорева). Следовательно, его можно использовать и применять для данных, отличных от тех, на которых он обучался.

### Заключение

Анализ рисунков 3-6 позволяет утверждать, что разработанные нейросетевые модели (цифровые двойники) трения при токарной обработке пригодны для их использования как в исследованиях, так и на практике и имеют высокую точность.

Однако стоит понимать, что в нейронной сети учтены только основные параметры, оказывающие наибольшее влияние на коэффициент трения при резании. Чтобы расширить

число входных параметров и сохранить точности работы ИНС, необходимо значительно увеличить базу данных (обучающую выборку).

В дальнейшем данную нейронную сеть можно переобучать на новых данных, тем самым делая ее еще более пригодной для использования в условиях конкретного производства.

#### Список литературы

1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания. – М.: Машгиз, 1956. – 365 с.
2. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 149 с.
3. Гордон М.Б. Исследование трения и смазки при резании металлов // Сборник научных трудов «Трение и смазка при резании металлов». – Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 1972. – С. 7-23.
4. Кабалдин Ю.Г., Башков А.А. Самоорганизация и механизм трения при резании // Вестник машиностроения. – 2023. – №2. – С. 23-27.
5. Кабалдин Ю.Г. Трение и износ при резании // Вестник машиностроения. – 1995. – №1. – С. 26-31.
6. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В. Управление киберфизическими механообрабатывающими системами в цифровом производстве на основе искусственного интеллекта и облачных технологий / Под ред. Ю.Г. Кабалдина. – М.: Инновационное машиностроение. 2019. – 293с.
7. Тихомиров В.П., Шалимов П.Б. Нейронносетевые модели в трибологии // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, №3. – С. 246-251.
8. Зорев Н.Н., Грановский Г.И., Бобров В.Ф. и др. Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
9. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
10. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

#### References

1. Zorev N.N. Questions of mechanics of the cutting process. – M.: Mashgiz, 1956. – 365 p.
2. Poletika M.F. Contact loads on the cutting surfaces of the tool. – M.: Mechanical Engineering, 1969. – 149 p.
3. Gordon M.B. Investigation of friction and lubrication when cutting metals // Collection of scientific papers "Friction and lubrication when cutting metals". – Cheboksary: Publ. house of ChSU, 1972. – P. 7-23.
4. Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A. Self-organization and the mechanism of friction during cutting // Bulletin of Mechanical Engineering. 2023, no. 2, pp. 23-27.
5. Kabaldin Yu.G. Friction and wear during cutting // Bulletin of Mechanical Engineering. 1995, no. 1, pp. 26-31.
6. Kabaldin Yu.G., Shatokhin D.A., Kolchin P.V. Management of cyberphysical machining systems in digital production based on artificial intelligence and cloud technologies / Edited by Yu.G. Kabaldin. – M.: Innovative Mechanical Engineering. 2019. – 293 p.
7. Tikhomirov V.P., Shalimov P.B. Neural network models in tribology // Friction and wear. 2000, vol. 21, no. 3, pp. 246-251.
8. Zorev N.N., Granovsky G.I., Bobrov V.F. et al. Development of the science of metal cutting. – M.: Mechanical Engineering, 1967. – 416 p.
9. Granovsky G.I., Granovsky V.G. Metal cutting. – M.: Higher School, 1985. – 304 p.
10. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – 344 p.

#### Сведения об авторах:

#### Information about authors:

<b>Кабалдин Юрий Георгиевич</b> – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения»	<b>Kabaldin Yuri Georgievich</b> – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of "Technology and equipment of mechanical engineering"
<b>Башков Андрей Алексеевич</b> – аспирант	<b>Bashkov Andrey Alekseevich</b> – postgraduate student
<b>Иванов Сергей Владимирович</b> – аспирант	<b>Ivanov Sergey Vladimirovich</b> – postgraduate student
<b>Замурев Иван Дмитриевич</b> – аспирант	<b>Zamuraev Ivan Dmitrievich</b> – postgraduate student
kicliu@mail.ru	

Получена 27.02.2023