

УДК 621.941.01

doi 10.54708/22259309\_2026\_23644

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Г. Ю. Сапожников<sup>1</sup>, П. П. Черников<sup>2</sup>, Е. А. Саркеева<sup>3</sup>, Г. А. Коновалов<sup>4</sup>,  
А. А. Сазанов<sup>5</sup>

<sup>1</sup>sapozhnikov.rep@mail.ru

<sup>1-5</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

**Аннотация.** В статье рассматриваются результаты экспериментов на износ режущего инструмента с покрытиями при различных режимах резания, анализируется влияние износа режущего инструмента на параметры привода металлорежущего станка и предлагается математическая модель износа режущего инструмента.

**Ключевые слова:** лезвийная обработка; резание; режущий инструмент; станок; сила трения; привод; износ; геометрия инструмента; электропривод; термоЭДС; аппроксимация.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные высокие темпы машиностроительного производства, в том числе в авиационной, станкостроительной и космической отраслях, предъявляют повышенные требования к надежности и работоспособности системы Станок–Приспособление–Инструмент–Деталь (СПИД). Вместе с тем работоспособность системы СПИД определяется жизненными циклами (межремонтными периодами) ее составляющих, среди которых особенно выделяется режущий инструмент (РИ) как элемент системы, подверженный наиболее интенсивному износу.

Необходимо отметить, что косвенные расходы (обычно не учитываемые) могут при плохом качестве инструмента или нерациональном его использовании во много раз превысить прямые расходы [1]. Таким образом, качественная и особенно оперативная количественная оценка износа РИ позволит значительно снизить себестоимость детали, процент брака, износ металлорежущего оборудования, станочного приспособления и сократить время простоев станка [2].

### ОЦЕНКА ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

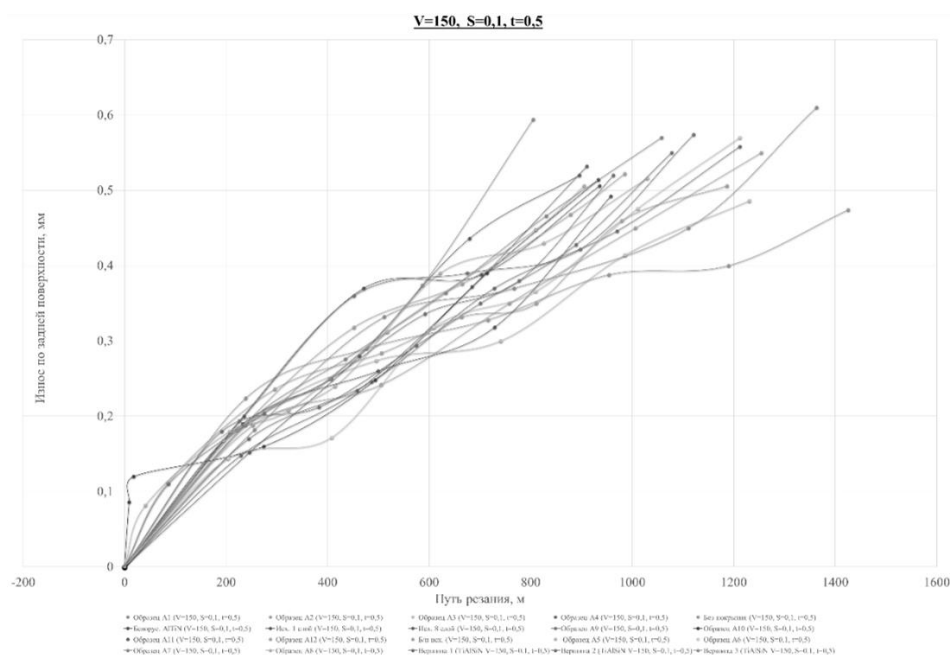
Классические методы оценки износа режущего инструмента разделяются на прямые (микрометрический, ультразвуковой, метод радиоактивных изотопов, оптический, электромеханический и визуальный) и косвенные (измерение параметров заготовки, измерение сил резания, оценка термоэлектрических характеристик зоны резания, виброакустические измерения). Прямые методы обладают высокой точностью и достоверностью оценки, однако зачастую требуют остановку процесса резания и извлечение инструмента. Косвенные методы позволяют проводить оценку состояния РИ непосредственно в процессе обработки, но с влиянием систематической и случайной погрешностей.

В условиях производства наиболее предпочтительными методами оценки износа РИ служат косвенные методы ввиду того, что они позволяют заблаговременно выявить момент наступления критического износа РИ в процессе обработки, не снижая производительность металлорежущего станка (МРС) и позволяя сократить процент брака.

Однако помимо вышеуказанных преимуществ, косвенные методы обладают существенным недостатком – необходимостью получения с помощью дополнительных устройств тарировочных зависимостей, описывающих связь величины износа РИ с определенной физической величиной, например, мощностью электропривода (ЭП) МРС. Тарировочные зависимости ввиду своей сложности и высокой степени неопределенности находятся экспериментальным методом.

Несмотря на наличие существенных проблем, связанных с оценкой износа РИ косвенными методами, экономика производства оправдывает их применение, особенно – метода оценки износа РИ по параметрам ЭП МРС, ввиду того, что представленный метод отличается простотой и надежностью. Параметры ЭП МРС, такие как эффективная мощность и сила тока, находятся в тесной связи с процессом лезвийной обработки: сила резания, увеличивающаяся в процессе износа РИ, оказывает механическое воздействие на шпиндель МРС, вращение которого на установленной частоте требует повышение мощности ЭП. Таким образом, представленный метод позволяет без внедрения дополнительных устройств и основываясь лишь на измерениях вольт-амперных характеристик (ВАХ) ЭП МРС.

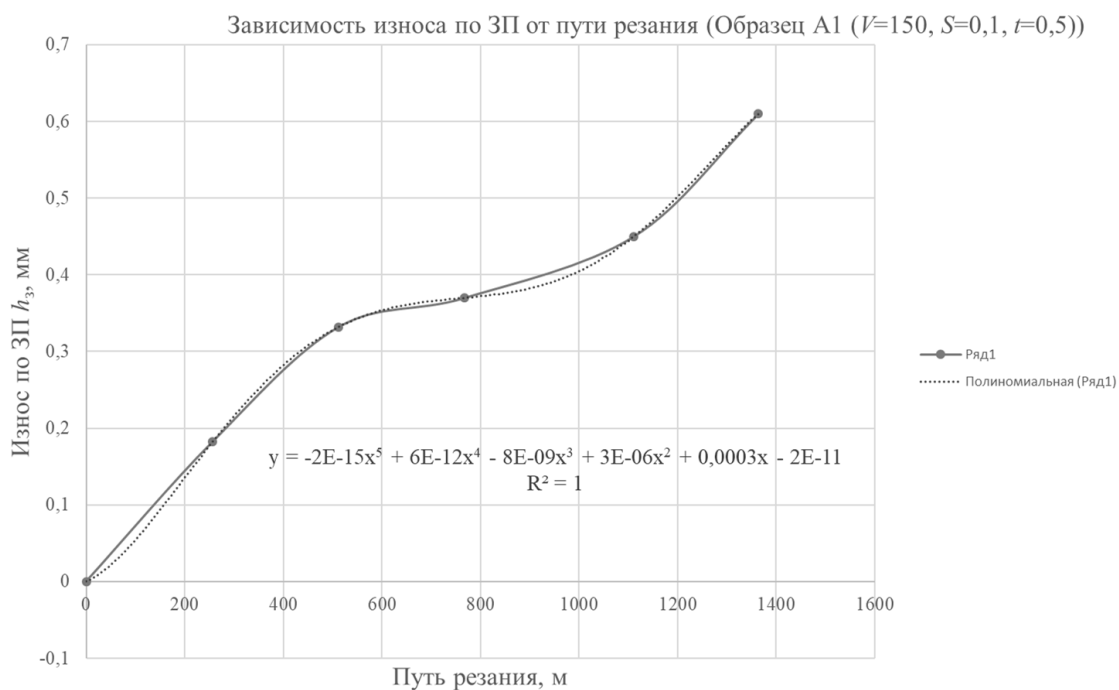
В целях получения достоверной базы данных, содержащей информацию о геометрическом износе РИ и соответствующим параметрам ЭП МРС, были проведены стойкостные испытания на токарно-винторезном станке 16К20 с частотным преобразователем. В качестве инструментального материала был назначен металлокерамический твердый сплав В35 Кировградского завода твердых сплавов (современный аналог ВК8), а в качестве обрабатываемого – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Обработка производилась на двух режимах: повышенной производительности ( $V = 150$  м/с,  $S = 0,1$  мм/об.,  $t = 0,5$  мм) и оптимальных ( $V = 120$  м/с,  $S = 0,1$  мм/об.,  $t = 0,5$  мм). Тип обработки – продольное точение. Геометрия режущей части: передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , задний угол  $\alpha = 6^\circ$ , главный и вспомогательный углы в плане  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$  [2]. Результаты приведены в виде графиков зависимостей износа по задней поверхности, мм, от путей резания, м (рис. 1–3), диаграмм интенсивности износа (рис. 4, 5) отрывка базы данных (рис. 6), а также графиков зависимостей эффективной мощности ЭП МРС от износа РИ по задней поверхности для некоторых образцов (рис. 7, 8). Формирование базы данных осуществлялось с помощью разработанного ранее программного обеспечения на основе искусственного интеллекта (ИИ) (рис. 9).



**Рис. 1.** Сводный график зависимости износа по задней поверхности от пути резания при обработке на режимах повышенной производительности



**Рис. 2.** Сводный график зависимости износа по задней поверхности от пути резания при обработке на оптимальных режимах



**Рис. 3.** График зависимости износа по задней поверхности от пути резания при обработке образцом A1 на производительных режимах

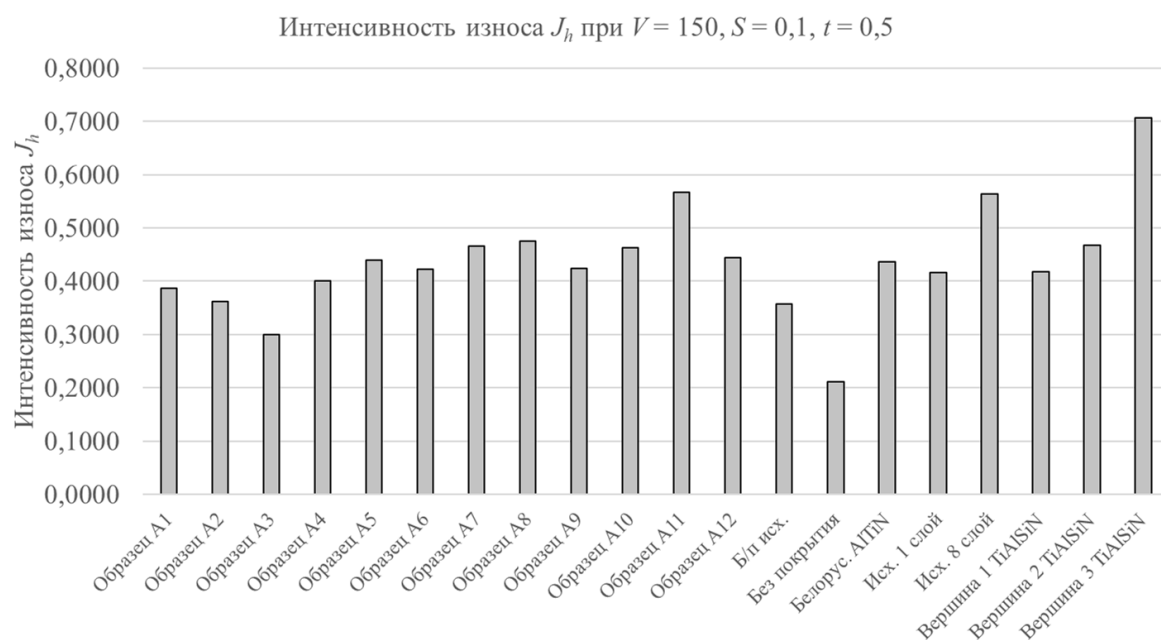


Рис. 4. Диаграмма интенсивности износа при обработке на режимах повышенной производительности

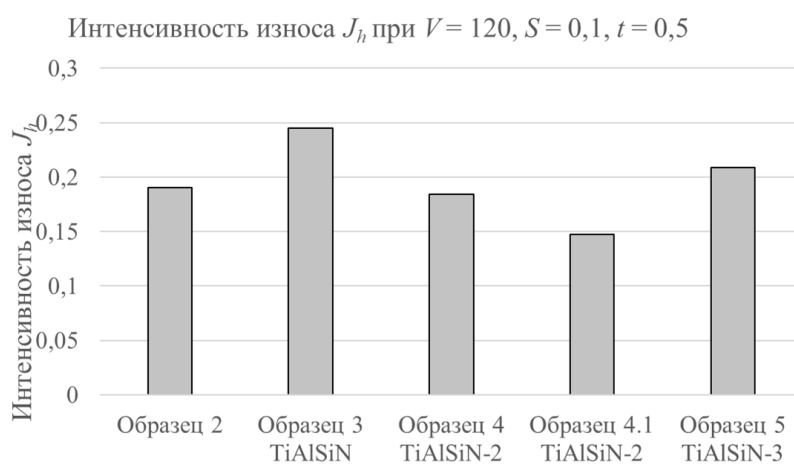
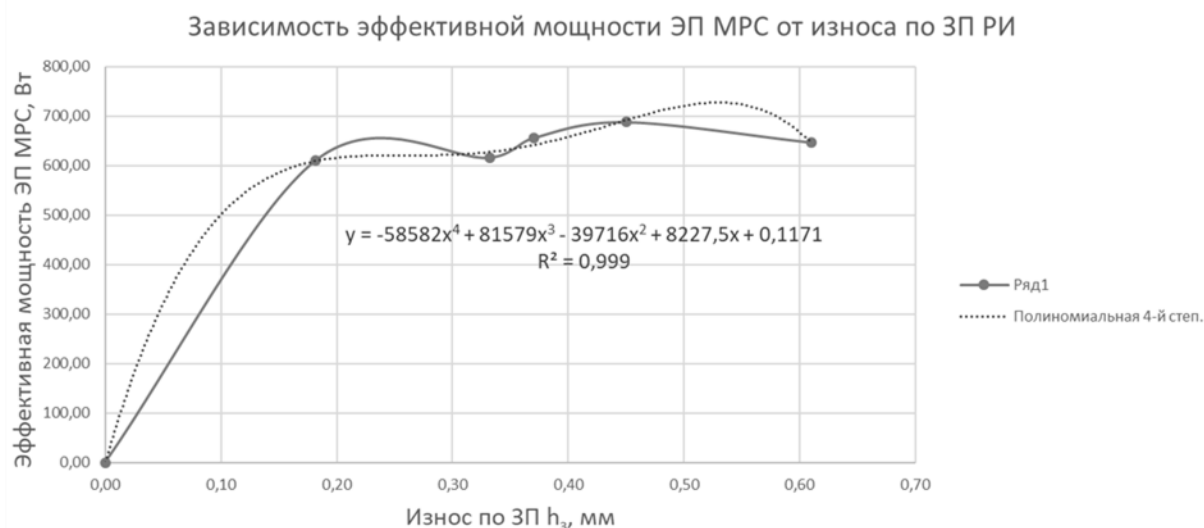


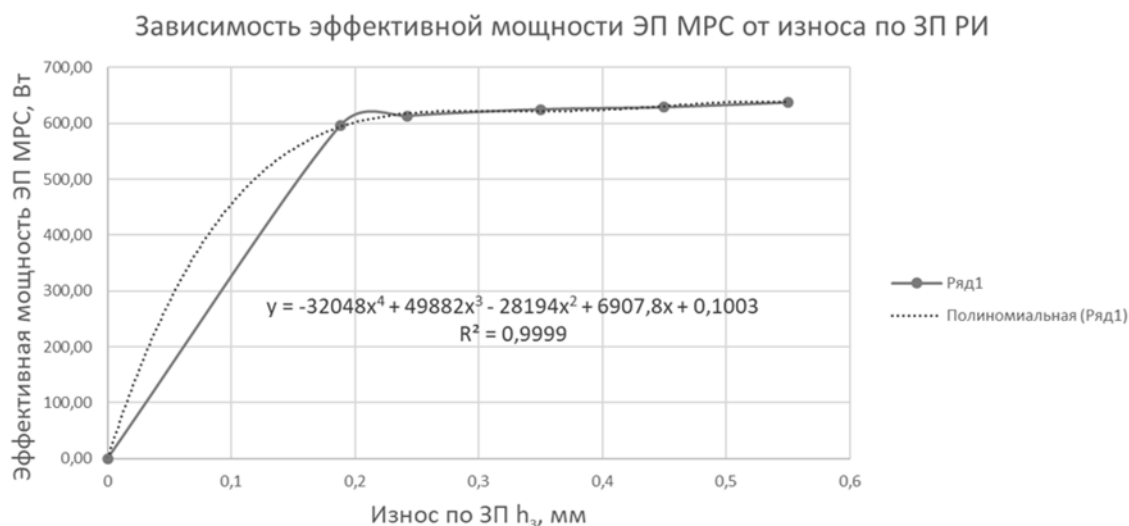
Рис. 5. Диаграмма интенсивности износа при обработке на оптимальных режимах

|    | A        | B             | C            | D                        | E                           | F                | G      | H           |
|----|----------|---------------|--------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|--------|-------------|
|    | Время, с | Напряжение, В | Сила тока, А | Эффективная мощность, Вт | Потребляемая энергия, кВт*ч | Частота тока, Гц | КПД, % | Термоздс, В |
| 1  |          |               |              |                          |                             |                  |        |             |
| 2  | 1.1      |               |              |                          |                             |                  |        |             |
| 3  | 0        | 227,8         | 3,454        | 611,60                   | 26,331                      | 50,0             | 0,78   | 0,0147      |
| 4  | 1        | 227,7         | 3,442        | 608,10                   | 26,331                      | 49,9             | 0,78   | 0,0146      |
| 5  | 2        | 227,6         | 3,460        | 611,20                   | 26,331                      | 50,0             | 0,78   | 0,0147      |
| 6  | 3        | 227,7         | 3,476        | 611,70                   | 26,331                      | 50,0             | 0,77   | 0,0147      |
| 7  | 4        | 227,7         | 3,476        | 611,70                   | 26,331                      | 50,0             | 0,77   | 0,0146      |
| 8  | 5        | 227,6         | 3,447        | 607,70                   | 26,331                      | 50,0             | 0,77   | 0,0145      |
| 9  | 6        | 227,6         | 3,462        | 610,00                   | 26,331                      | 49,9             | 0,77   | 0,0145      |
| 10 | 7        | 227,6         | 3,462        | 610,00                   | 26,331                      | 50,0             | 0,77   | 0,0144      |
| 11 | 8        | 227,7         | 3,443        | 608,20                   | 26,331                      | 50,0             | 0,78   | 0,0145      |
| 12 | 9        | 227,7         | 3,465        | 612,50                   | 26,331                      | 50,0             | 0,78   | 0,0145      |
| 13 | 10       | 227,7         | 3,504        | 618,80                   | 26,331                      | 49,9             | 0,78   | 0,0144      |
| 14 | 11       | 227,7         | 3,474        | 611,57                   | 26,331                      | 50,0             | 0,77   | 0,0144      |
| 15 | 12       | 227,7         | 3,474        | 611,57                   | 26,331                      | 50,0             | 0,77   | 0,0144      |

Рис. 6. Отрывок сформированной базы данных



**Рис. 7.** Зависимость эффективной мощности ЭП МРС от износа по задней поверхности для образца 1



**Рис. 8.** Зависимость эффективной мощности ЭП МРС от износа по задней поверхности для образца 2



**Рис. 9.** Интерфейс разработанного ПО для формирования базы данных

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Из рис. 6, 7 видно, что с высокой доверительной вероятностью ( $>0,99$ ) зависимость эффективной мощности ЭП МРС от износа РИ описывается полиномиальной аппроксимирующей

кривой четвертого порядка. На примере некоторых образцов (рис. 7) видно влияние специфики процессов лезвийной обработки: преодоление этапа нормальной эксплуатации и переход в зону критического износа ( $h_3 > 0,5$  мм) может приводить к снижению мощности, что объясняется перегревом зоны резания вследствие трения задней поверхности о заготовку и деформации затупленным режущим клином обрабатываемой поверхности. Перегрев приводит к образованию квазизидкого слоя между РИ и заготовкой, выступающего в роли антифрикционной смазки [3].

Необходимо отметить, что значения коэффициента детерминации  $R^2$ , приближающиеся к единице, хотя и свидетельствуют о высокой степени соответствия аппроксимирующей кривой экспериментально полученному графику, но не исключают возможности некорректного описания физического процесса за пределами рассматриваемого числового интервала, что объясняется склонностью полиномиальной аппроксимации высокого порядка к переобучению.

Для проверки достоверности полученной математической модели возникла необходимость анализа функций износа РИ от параметров ЭП МРС  $h(N)$  и длины пути резания  $h(L)$ . Наиболее предпочтительный вариант – дифференцирование функции по длине резания с дальнейшим сравнением расчетных и экспериментальных значений. Проверка осуществлялась на примере образца 1.

Уравнение функции  $h(L)$  для рассматриваемого образца (рис. 3) имеет вид:

$$h(L) = -2E-15L^5 + 6E-12L^4 - 8E-09L^3 + 3E-06L^2 + 0,0003L - 2E-11. \quad (1)$$

В результате дифференцирования функции (1) по  $L$  имеем:

$$\frac{dh}{dL} = 5(-2E-15)L^4 + 4(6E-12)L^3 - 3(8E-09)L^2 + 2(3E-06)L + 0,0003. \quad (2)$$

Полученная зависимость (2) представляет собой функцию интенсивности износа по пути резания  $V_{hL}$ , мм/м – величины, количественно оценивающей износ РИ на метр длины пути резания.

График зависимости (2) имеет вид:

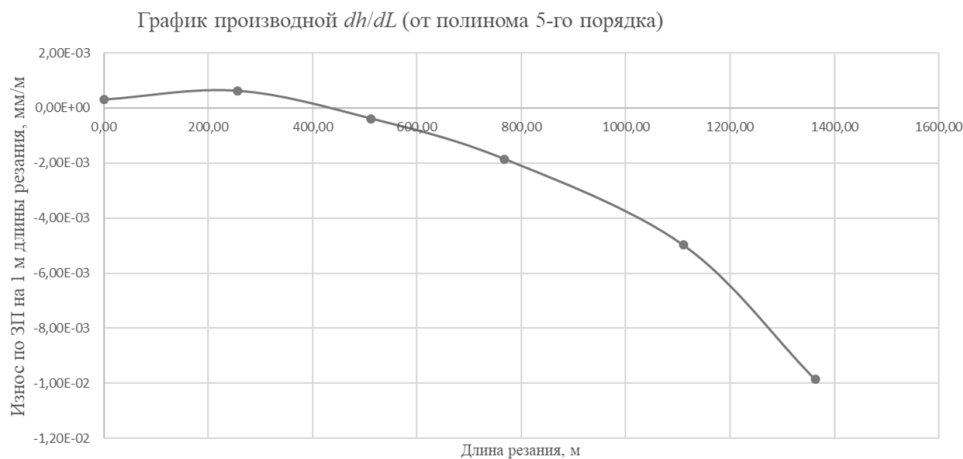
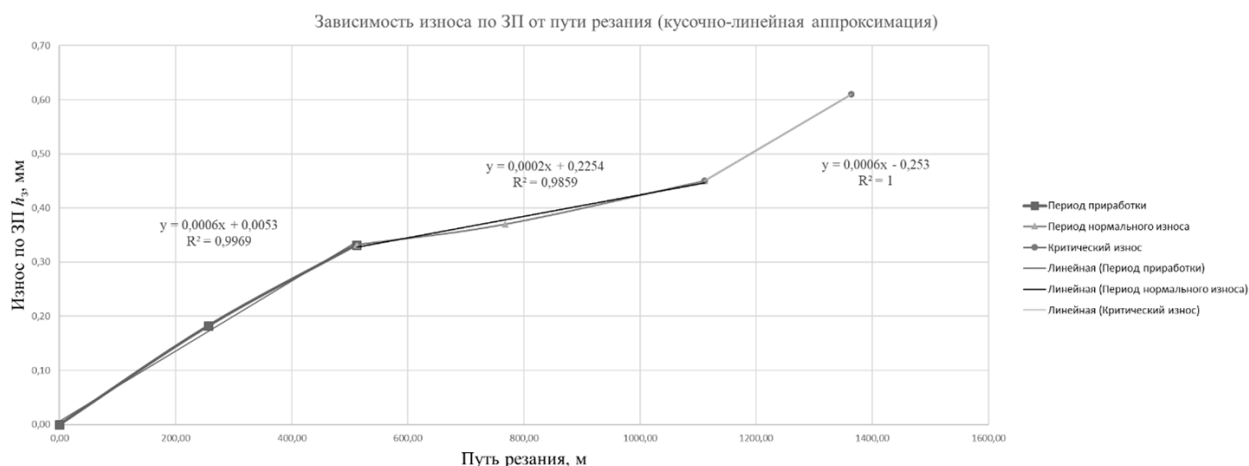


Рис. 10. График функции интенсивности износа РИ по пути резания

Из рис. 10 очевидно, что «отрицательный» износ РИ противоречит физическим основам процесса резания. Следовательно, математическая модель износа РИ, описываемая полиномом 5-го порядка, переобучена. Для решения упомянутой проблемы была проведена кусочно-линейная аппроксимация функции  $h(L)$  (рис. 11):



**Рис. 11.** График функции износа РИ от длины пути резания с кусочно-линейной аппроксимирующей кривой

Из рис. 11 получаем уточненную математическую модель износа РИ по длине пути резания (3):

$$h(L) = \begin{cases} 0,0006L + 0,0053 & \text{при } L \in [0; 511,82]; \\ 0,0002L + 0,2254 & \text{при } L \in (511,82; 1110,65]; \\ 0,0006L - 0,253 & \text{при } L \in (1110,65; 1363,42]. \end{cases} \quad (3)$$

Приближенные к единице значения коэффициентов детерминации  $R^2$  для кусочных составляющих функции (3) свидетельствуют о высокой степени соответствия математической модели экспериментально полученному графику. Деление математической модели на составляющие также позволило выделить участки, соответствующие приработке, нормальному и критическому износу РИ. Дифференцирование упомянутых составляющих по длине пути резания  $L$ , м, позволяет количественно оценить соответствующие значения интенсивности износа по пути резания  $V_{hL}$ , мм/м (табл. 1).

Помимо оценки износа РИ по длине пути резания, существует возможность контроля работоспособности инструмента по времени. Учитывая, что:

$$V = dL/dt, \quad (4)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $t$  – время резания, мин, и воспользовавшись правилами дифференцирования сложных функций для функции (3), получим:

$$dh/dt = dh/dL * dL/dt = V dh/dL = V_{hL} * V. \quad (5)$$

Таким образом, произведение интенсивности износа по пути резания и скорости резания позволяет определить величину интенсивности износа РИ по времени  $V_{ht}$ , мм/мин, оценивающую количественно геометрический износ РИ за единицу времени. В табл. 1 представлены расчетные значения интенсивности износа по пути резания  $V_{hL}$ , мм/м и интенсивности износа РИ по времени  $V_{ht}$ , мм/мин, а также результаты проверки расчётного износа РИ с фактическим.

Таблица 1

**Проверочный расчёт математической модели износа РИ**

| /                                               | Приработка | Нормальный износ | Критический износ |
|-------------------------------------------------|------------|------------------|-------------------|
| Интенсивность износа по пути резания, мм/м      | 0,00       | 0,00             | 0,00              |
| Длина пути резания, м                           | 511,82     | 598,83           | 252,77            |
| Расчетный износ по пути резания, мм             | 0,31       | 0,12             | 0,15              |
| Фактический износ, мм                           | 0,33       | 0,12             | 0,16              |
| Отклонение от фактического значения, %          | 6,06       | 0,00             | 6,25              |
| Интенсивность износа по времени резания, мм/мин | 0,09       | 0,03             | 0,09              |
| Время резания, мин                              | 3,40       | 4,10             | 1,65              |
| Расчетный износ по времени резания, мм          | 0,31       | 0,12             | 0,15              |

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных работ была разработана и проверена на достоверность математическая модель износа режущего инструмента, позволяющая количественно оценивать износ инструмента в процессе обработки по мощности электропривода станка, длине пути резания или времени работы. Дальнейшие разработки в упомянутом направлении нацелены на создание статистической базы данных, подтверждающих достоверность разработанной математической модели для представленного массива экспериментальных образцов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Семенченко, И. И. Проектирование металлорежущих инструментов /И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. – М.: Книга по требованию, 2024. – 954 с.
2. Сапожников, Г. Ю. Износ инструмента и контактные явления при продольном точении с покрытиями / Г. Ю. Сапожников, А. А. Сазанов // Мавлютовские чтения. Мат-лы XIX Всероссийской молодежной научной конференции. В 8-ми томах. – Уфа, 2025. – С. 326–332.
3. Хадиуллин, С. Х. Микроструктурные исследования изнашиваемых поверхностей твердосплавного инструмента // СТИН. – 2008. – № 3. – С. 12–15.

**ОБ АВТОРАХ**

**САПОЖНИКОВ** Георгий Юрьевич, студент каф. АТП.

**ЧЕРНИКОВ** Петр Петрович, доцент, к.т.н., доцент каф. АТП.

**САРКЕЕВА** Елена Александровна, к.ф.-м.н., ст. преп. каф. МИФМ.

**САЗАНОВ** Андрей Александрович, аспирант каф. АТП.

**КОНОВАЛОВ** Георгий Андреевич, разработчик программного обеспечения

**METADATA**

**Title:** development of a mathematical model of cutting tool wear.

**Author:** G. Y. Sapozhnikov<sup>1</sup>, P. P. Chernikov<sup>2</sup>, E. A. Sarkeeva<sup>3</sup>, G. A. Konovalov<sup>4</sup>, A. A. Sazanov<sup>5</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> sapozhnikov.rep@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (36), pp. 44-52, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The article discusses the results of experiments on the wear of coated cutting tools under various cutting conditions, analyzes the impact of cutting tool wear on the parameters of a metal-cutting machine drive, and proposes a mathematical model of cutting tool wear.

**Key words:** Blade processing, cutting, cutting tool, machine, friction force, drive, wear, tool geometry, electric drive, thermo-EMF, approximation.

**About authors:**

**SAPOZHNIKOV Georgy Yurievich**, student dept. of ATC.

**CHERNIKOV Petr Petrovich**, associate professor, phd, associate professor of dept. of ATC.

**SARKEEVA Elena Aleksandrovna**, phd, lecturer of dept. of MIFM.

**SAZANOV Andrey Aleksandrovich**, postgraduate dept. of ATC.

**KONOVALOV Georgy Andreevich**, software developer.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания № FRRR-2026-0005 «Исследование новых материалов покрытий, полученных методом ассистированного вакуумно-дугового осаждения, для упрочнения металло-режущих инструментов из твердого сплава, применяемых для обработки материалов авиадвигателестроительной отрасли».