УДК 621.9.01:519.6 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-94-97

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗМЕРНОЙ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бердников О.О.[1], Капалин Н.Ю.[1], Реченко Д.С.[2], Каменов Р.У.[3]
[1]Омский государственный технический университет, Омск;
[2]Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк;
[3]Тольяттинский государственный университет, Тольятти

Ключевые слова: регрессионная модель, размерная стойкость, точение, труднообрабатываемый материал, метод наименьших квадратов, допуск, режим резания.
Аннотация. Рассматривается математическое описание размерной стойкости режущего инструмента при точении труднообрабатываемых материалов. На основе экспериментальных данных для пяти материалов построены степенные регрессионные зависимости, учитывающие скорость резания, подачу, глубину резания и допуск на обработку. Особенность подхода состоит в использовании размерного критерия стойкости и трёх уровней допуска. Сопоставление показателей степени позволяет оценить относительную чувствительность стойкости к изменению технологических параметров в пределах исследованного диапазона.

COMPARATIVE ANALYSIS OF REGRESSION MODELS FOR DIMENSIONAL DURABILITY OF CUTTING TOOLS DURING THE TURNING OF DIFFICULT-TO-MACHINE MATERIALS

Berdnikov O.O.[1], Kapalin N.Yu.[1], Rechenko D.S.[2], Kamenov R.U.[3]
[1]Omsk State Technical University, Omsk;
[2]Siberian State Industrial University, Novokuznetsk;
[3]Tolyatti State University, Tolyatti

Keywords: regression model, dimensional tool life, turning, difficult-to-machine material, least squares method, tolerance, cutting parameters.
Abstract. This paper presents a mathematical description of the dimensional tool life of a cutting tool during the turning of difficult-to-machine materials. Based on experimental data for five different materials, power-law regression models have been developed that account for cutting speed, feed rate, depth of cut, and machining tolerance. A key feature of this approach is the use of a dimensional tool life criterion and three distinct tolerance levels. Comparing the exponents allows for an assessment of the relative sensitivity of tool life to changes in technological parameters within the investigated range.

Введение

При точении труднообрабатываемых материалов стойкость инструмента определяется не только износом режущей кромки, но и сохранением требуемой размерной точности детали. Для технологической подготовки производства важно оценивать, как скорость резания, подача, глубина резания и установленный допуск связаны со временем работы инструмента до выхода размера за допустимые пределы. Эту задачу можно решать с помощью регрессионной модели, построенной по результатам планируемого эксперимента [1].

Цель работы – сопоставить структуру степенных моделей размерной стойкости для пяти материалов и определить относительное влияние технологических факторов в пределах проведённых экспериментов.

Материалы и методика моделирования

Эксперименты выполнены на токарном станке с ЧПУ DMG NEF 400. Рассматривались стали 12Х18Н10Т, 30ХГСА, 14Х17Н2, 13Х11Н2В2МФ-Ш и титановый сплав ВТ3-1. В качестве отклика использовалось время сохранения заданной размерной точности *T*, мин. Независимыми факторами являлись скорость резания *V*, подача *f*, глубина резания *D* и допуск на обработку δ.

Для каждого материала применялся полный двухуровневый факторный план 2^3 по факторам *V*, *f* и *D* с тремя повторениями центральной точки. План скрещивался с тремя уровнями допуска: ±0,03; ±0,05 и ±0,10 мм. Таким образом, на каждый материал приходилось 33 опыта: (8 + 3) × 3 [2]. Коэффициенты определялись методом наименьших квадратов после логарифмирования степенной зависимости:

$$T = C \cdot V^{a_v} \cdot f^{a_f} \cdot D^{a_D} \cdot \delta^{a_\delta},$$

где T – размерная стойкость режущего инструмента, мин; C – эмпирический коэффициент регрессионной модели; V – скорость резания, м/мин; f – подача, мм/об; D – глубина резания, мм; δ – допуск на обработку, мм; a_v, a_f, a_D, a_δ – показатели степени, характеризующие влияние соответствующих факторов на расчетную стойкость.

После логарифмирования модель приводится к линейной форме:

$$LnT = lnC + a_v lnV + a_f lnf + a_D lnD + a_\delta ln\delta,$$

где *ln* – натуральный логарифм; показатели степени характеризуют относительную чувствительность расчётной стойкости к соответствующему фактору при неизменности остальных переменных.

Результаты и обсуждение

В результате обработки экспериментальных данных получены модели для пяти материалов. Для сопоставления влияния факторов в таблице 1 приведены показатели степени и коэффициенты детерминации.

Табл. 1. Показатели степенных моделей размерной стойкости

Материал	a_v	a_f	a_D	a_δ	R^2, %
12Х18Н10Т	−2,090	−1,456	−0,167	0,896	92,44
30ХГСА	−1,961	−1,249	−0,371	0,224	93,31
ВТ3-1	−1,408	−1,174	−0,436	1,003	96,28
14Х17Н2	−1,674	−1,594	−0,576	1,000	93,67
13Х11Н2В2МФ-Ш	−2,076	−1,411	−0,436	0,835	92,48

Примечание: R^2 – коэффициент детерминации, характеризующий долю вариации экспериментальных значений отклика, описываемую моделью.

Для всех пяти материалов показатель при скорости резания отрицателен (от −1,408 до −2,090): в исследованном диапазоне повышение скорости связано со снижением расчётной стойкости. Аналогичный знак имеют показатели при подаче (от −1,174 до −1,594), что отражает уменьшение стойкости при увеличении подачи. Влияние глубины резания выражено слабее, хотя для стали 14Х17Н2 модуль показателя a_D достигает 0,576 [3].

Показатель при допуске положителен во всех моделях, но его величина различается. Для 12Х18Н10Т, ВТ3-1, 14Х17Н2 и 13Х11Н2В2МФ-Ш значения a_δ близки к единице; для 30ХГСА он существенно меньше (0,224). Следовательно, в пределах данного плана модель для 30ХГСА описывает более слабую зависимость размерной стойкости от допуска. Выводы нельзя автоматически экстраполировать за пределы изученных режимов.

Коэффициенты детерминации в сводной таблице главы составляют 92,44-96,28%. Это характеризует согласование моделей с использованной экспериментальной выборкой, но само по себе не гарантирует такой же точности вне неё. На рисунке один показано сравнение экспериментальных значений стойкости и расчетных для исследуемых материалов.

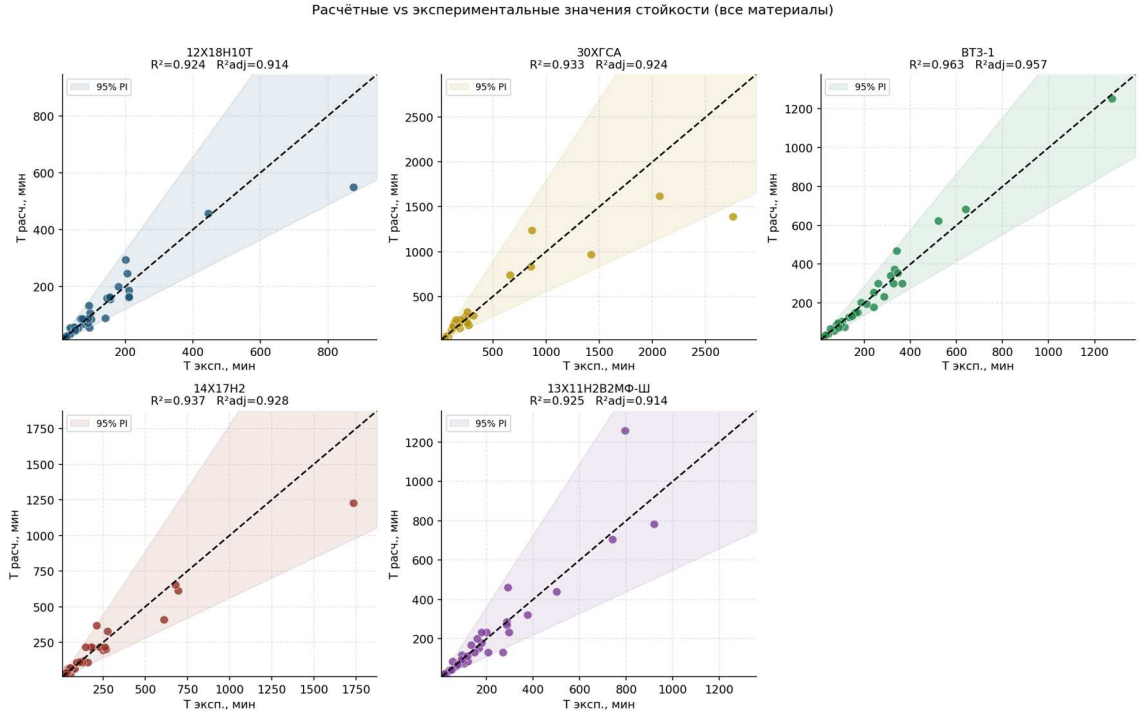


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и расчетных значений исследуемых материалов

Для практического применения необходимо учитывать результаты перекрёстной проверки, прогностические интервалы и подтверждать расчётные рекомендации контрольными измерениями.

Выводы

1. Для пяти труднообрабатываемых материалов построены степенные модели размерной стойкости на основе плана 2^3 с тремя повторениями центральной точки и тремя уровнями допуска; объём каждого плана составил 33 опыта.

2. В пределах исследованных режимов скорость резания и подача имеют отрицательную связь с расчётной стойкостью во всех пяти моделях.

3. Показатель степени при допуске заметно различается между материалами, что обосновывает необходимость учитывать материал при прогнозировании размерной стойкости.

4. Модели предназначены для расчётной оценки внутри исследованных диапазонов; применение за их пределами требует дополнительной экспериментальной проверки.

Список литературы

1. Бердников О.О., Капалин Н.Ю., Реченко Д.С. Влияние физико-механических свойств обрабатываемых материалов на стойкость режущего инструмента при точении // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 16-17 марта 2026 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2026. – С. 35-43.
2. Лапшин В.П., Моисеев Д.В. Определение оптимального режима обработки металлов при анализе динамики систем управления резанием // Обработка металлов. – 2023. – Т. 25, №1. – С. 16-43. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-16-43.
3. Екимова М.Ю., Тесленко Е.А. Применение полного факторного плана для расчета уравнений регрессии с использованием ЭВМ // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (г. Знаменск, 11-12 апреля 2024 г.). – Астрахань: Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, 2024. – С. 53-56.

Сведения об авторах:

Бердников Олег Олегович – аспирант;

Капалин Николай Юрьевич – аспирант;

Реченко Денис Сергеевич – д.т.н., доцент, и.о. ректора;

Каменов Ренат Уахитович – к.т.н., начальник НИЛ. «Механическая обработка и технологии управления поверхностным слоем».