

УДК 621.9.015

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОЙКОСТИ ЛЕЗВИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

А. А. БОНДАРЕВ¹, Я. Н. ОТЕНИЙ²,
Ю. Л. ЧИГИРИНСКИЙ³, Д. В. КРАЙНЕВ⁴, А. Р. ИНГЕМАССОН⁵

¹alexander_bondarev@mail.ru, ²oteny3@rambler.ru,

³Julio-Tchigirinsky@yandex.ru, ⁴krainevdv@mail.ru, ⁵aleing@yandex.ru

^{1,2} ФГБОУ ВПО «Камышинский технологический институт (филиал) ВолгГТУ» (КТИ)

³⁻⁵ ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Поступила в редакцию 03 марта 2015 г.

Аннотация. Создана математическая модель, прогнозирующая стойкость лезвий режущего инструмента при точении с опережающим пластическим деформированием (ОПД) по обрабатываемой поверхности. Регрессионный анализ выявил характер зависимости функции отклика и величину влияния каждого из факторов на нее. Предложена формула для расчета стойкости лезвия режущего инструмента, расширяющая возможности применения способа резания с ОПД в практике механической обработки.

Ключевые слова: точение; износ; стойкость; режущий инструмент; опережающее пластическое деформирование; твердый сплав; конструкционная сталь.

Конструкционные легированные стали широко применяются для изготовления деталей машин. Операции обработки точением применяются в технологических процессах изготовления валов и других тел вращения, к которым предъявляются требования повышенного качества поверхности и износостойкости. Спецификой обработки конструкционных легированных сталей является сложное нагруженное состояние режущего клина, что приводит к высокой изношенности лезвий инструмента. Рост производительности обработки точением конструкционных легированных сталей является актуальной задачей.

Представленную задачу можно решить следующими способами: повышением ресурса работоспособности режущего инструмента, производительности процесса обработки и качества получаемых изделий. Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [1], совмещающее стадии предварительного поверхностного пластического деформирования и последующего съема припуска на обработку режущим инструментом, является комбинированным методом обработки, позволяющим получить комплексный результат роста эффективности по перечисленным направлениям. Из-

менение физико-механических свойств обрабатываемого материала после ОПД обуславливает формирование таких условий протекания физических процессов в зоне резания, которые способствуют снижению нагрузок на режущий клин, условий контактного взаимодействия [1].

Исследованиями установлено [2], что точение конструкционных легированных сталей с ОПД по обрабатываемой поверхности позволяет значительно снизить величину площадки износа по главной задней поверхности, тем самым повышая производительность процесса резания. При точении с ОПД жаропрочной релаксационно-стойкой конструкционной легированной стали 30ХМА происходило снижение значения площадки износа по передней поверхности до двух раз по сравнению с традиционной обработкой. Выявлены резервы существенного повышения производительности процесса резания. Одинаковые значения площадки износа по передней поверхности получались при традиционном точении на одних скоростях и при резании на больших скоростях предварительно продеформированного металла.

Для исследования закономерностей износа лезвий режущего инструмента при точении с ОПД, прогнозирования результатов процесса и

расширения возможностей практического применения способа резания в свете представленных преимуществ необходимо произвести регрессионный анализ влияния основных параметров обработки на износ лезвий режущего инструмента.

Исследования выполнялись для получения точения (глубина резания $t = 1$ мм) конструкционной легированной стали 30ХМА (сортовой прокат, состояние поставки, $\sigma_b = 930$ МПа). Инструмент был представлен сменными многогранными твердосплавными пластинами Т15К6, ВК6, ТН20 формы W ($\alpha = 0^\circ$ ISO 1832-1991); радиус сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок $r = 0,8$ мм. Обработка выполнялась без смазочно-охлаждающих технологических сред. В качестве факторов, определяющих значение функции отклика (T), были выбраны: скорость резания, теплопроводность инструментального материала, подача и коэффициент ОПД [1]:

$$K_{\text{ОПД}} = \frac{h_{\text{нак}}}{t}, \quad (1)$$

где $h_{\text{нак}}$ – глубина наклепанного поверхностного слоя, мм; t – глубина резания, мм.

Принятые в исследовании натуральные и безразмерные значения факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Натуральные значения факторов

Факторы	Натуральные значения		
	-1	0	+1
Нормированное значение (уровень)	-1	0	+1
Скорость резания, м/мин	90	135	180
Теплопроводность инструментального материала, Вт/м·К	(ТН20)	(Т15К6)	(ВК6)
Скорость продольной подачи, мм/об	0,083	0,166	0,256
Коэффициент ОПД ($K_{\text{ОПД}}$)	0,001	1	2

Исследованиями выявлен экстремальный характер изменения влияния ОПД обрабатываемой поверхности на эффективность процесса точения [2]. С увеличением $K_{\text{ОПД}}$ до некоторой величины происходит снижение силы резания, достигая минимума при определенном отношении $h_{\text{нак}}$ к t (для описанных в данной статье условий это соотношение равно 2. Дальнейший рост $K_{\text{ОПД}}$ приводит к снижению эффективности процесса. Нижний уровень $K_{\text{ОПД}}$ по экспериментам равен нулю (в данном случае процесс резания происходил без ОПД), но для построения модели принимается равным 0,001 для возможности выполнения дальнейших расчетов

включающих логарифмирование. При этом допущении глубина наклепа была бы равна 0,0005 мм, что ничтожно мало. Таким образом, эта условность не повлияет на результат регрессионного анализа.

Для исследований приняты как наиболее часто рассматриваемые математические модели следующих спецификаций: аддитивная (линейная) и мультипликативные (степенная и показательная).

Задача использования математических методов планирования экспериментов состоит в том, чтобы после реализации опытов получить математическое описание функции отклика в виде математической модели, связывающей эту функцию с варьируемыми факторами. Минимальный и достаточный объем статистической выборки, на основании которой выполняется моделирование, определяется в зависимости от спецификации модели и количества рассматриваемых факторов (в данном исследовании 4) и равен:

- для аддитивной модели:

$$k_{\text{min}} = 2^n = 2^4 = 16; \quad (2)$$

- для мультипликативных моделей:

$$k_{\text{min}} = 3^n = 3^4 = 81, \quad (3)$$

где k_{min} – количество независимых опытов при полном факторном эксперименте; n – число факторов.

При построении модели первоначальную формальную оценку существования зависимости функции отклика от каждого из рассматриваемых факторов получали, опираясь на величину коэффициента парной корреляции [3], который показывает вероятность существования линейной зависимости между двумя статистическими выборками равного объема. Аналогичным образом приближенно оценивается существование взаимосвязи между факторами.

На основании проведенных расчетов установлено, что выбранные факторы являются попарно взаимно независимыми и каждый из них оказывает влияние на величину функции отклика. Для оценки степени влияния каждого из факторов была построена многофакторная регрессионная модель.

В процессе построения модели выполнены следующие необходимые операции.

Корректная оценка степени влияния факторов на характер и величину функции отклика возможна только при условии сопоставимости значений всех факторов и собственно целевой функции. Поскольку рассматриваемые факторы имеют различный масштаб, было выполнено

нормирование исходных данных по правилам [3, 4], соответствующим регрессионным моделям различных спецификаций.

Построение модели после нормирования предполагало выполнение следующих, независимых от ее спецификации, последовательных расчетов [3, 4]: расчет коэффициентов регрессии для выбранных факторов; расчет коэффициента регрессии, определяющего влияние случайных факторов; расчет нормированных значений функции отклика; расчет критерия Стьюдента, определяющего существенность отличия

Сравнение регрессионных моделей: коэффициентов регрессии от нулевых значений; оценка статистической значимости и определение степени влияния рассматриваемых факторов (для линейной, степенной и показательной моделей все анализируемые факторы оказались статистически значимыми); расчет прогнозируемых нормированных значений функции отклика с учетом статистической значимости факторов; расчет восстановленных (в реальном масштабе) значений функции отклика для нормированных рядов; оценка адекватности построенных моделей по величине F -критерия.

Для анализа построенных математических моделей сведем наиболее существенные результаты моделирования в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать следующие выводы.

Средняя относительная погрешность (расхождение значений стойкости инструмента T , рассчитанных по модели и полученных опытным путем) показательной модели ниже аналогичных параметров степенной и линейной (9,08 % – линейная; 8,61 % – степенная; 6,49 % – показательная), что является преимуществом. Степень влияния на стойкость инструмента слу-

чайных факторов, выражаемая соответствующим коэффициентом регрессии, у показательной и степенной модели равна по абсолютной величине – 0,03, т. е. незначительна. У линейной модели влияние случайных факторов характеризуется абсолютной величиной – 0,28, что весьма существенно на фоне принятых в исследовании факторов. Таким образом, показательная модель облегчает дальнейший прогноз стойкости режущего инструмента после токарной обработки с ОПД, так как позволяет сделать вывод о том, что наиболее значимое влияние на стойкость режущего инструмента оказывают именно скорость резания, теплопроводность инструментального материала, подача, ОПД.

Коэффициенты регрессии показательной модели показывают, что на стойкость режущего инструмента во время токарной обработки с ОПД в порядке возрастания оказывают влияние следующие факторы: подача, теплопроводность инструмента, ОПД, скорость. С увеличением подачи происходит рост ресурса работоспособности режущего инструмента (коэффициент регрессии 0,04 для показательной модели). С ростом теплопроводности происходит повышение стойкости режущего инструмента, в соответствии с традиционно сложившимися представлениями (коэффициент регрессии 0,08 для показательной модели). Использование ОПД позволяет значительно повысить стойкость режущего инструмента (коэффициент регрессии 0,33 для показательной модели). С увеличением скорости резания происходит снижение стойкости лезвий режущего инструмента (коэффициент регрессии – 0,47 для показательной модели), что согласуется с традиционными представлениями о влиянии скорости резания на стойкость режущего инструмента.

Таблица 2

Параметр	Спецификация модели		
	Линейная	Степенная	Показательная
Оценка влияния факторов			
Случайные факторы	– 0,28	– 0,03	– 0,03
Скорость резания	– 0,40	– 0,48	– 0,47
Теплопроводность инструментального материала	0,14	0,08	0,08
Подача	0,09	0,03	0,04
Коэффициент ОПД ($K_{\text{опд}}$)	0,35	0,22	0,33
Достоверность адекватной модели, %	99,9	99,9	99,9
Оценка погрешности			
Стандартное отклонение	2,014	2,014	2,014
F -критерий	2,530	2,344	3,342
Средняя относительная погрешность, %	16,08	8,61	6,49

Регрессионная математическая модель влияния основных параметров обработки резанием с ОПД на показатель стойкости режущего инструмента при точении конструкционной легированной стали 30ХМА реализуется в виде следующей зависимости:

$$T = 23.65 \times 0.995^V \times 1.0023^\lambda \times 1.3^S \times 1.2^{K_{\text{ОПД}}}, \quad (4)$$

где V – скорость резания, м/мин; λ – теплопроводность инструментального материала, Вт/м×К; S_o – подача, мм/об; $K_{\text{ОПД}}$ – коэффициент ОПД.

Эта формула позволяет рассчитать величину стойкости при традиционном точении и с ОПД, т. е. спрогнозировать повышение эффективности процесса резания при изучаемом способе и учесть это в технологическом маршруте обработки. Диапазоны варьирования факторов (например, скорости резания 90–180 м/мин) и условия обработки для практического применения зависимости описаны выше.

ВЫВОДЫ

1. Опережающее пластическое деформирование является комплексным способом повышения эффективности точения конструкционных легированных сталей. Изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала после ОПД, изменение физических процессов в зоне обработки позволяют снизить температурно-силовую напряженность съема припуска и нагрузки на режущий клин.

2. Проведен регрессионный анализ, который позволяет оценить степень влияния факторов на стойкость режущего инструмента. Предложена формула для расчета стойкости режущего инструмента T , которая расширяет возможности применения способа резания с ОПД в практике механической обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ингеманссон А. Р.** Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сталей ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов с использованием опережающего пластического деформирования: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2012. 209 с. [A.R. Ingemansson, *Improving the efficiency of turning hard-ferritic steels, martensitic-ferritic and martensitic grades by using advancing plastic deformation* (in Russian), Thesis candidate of technical science, Volgograd, 2012.]

2. **Бондарев А. А., Крайнев Д. В., Ингеманссон А. Р., Козачухненко И. Н., Исламгалиев А. И.** Повышение работоспособности режущего инструмента при точении с опережающим пластическим деформированием // *SWorld: сб. науч. тр. (Современные направления теор. и прикл. исследований '2014: матер. междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 18–30 марта 2014).* 2014. С. 63–70. [A.A. Bondarev, et. al.,

"Improving the efficiency of the cutting tool for turning with advancing plastic deformation", (in Russian). *SWorld Modern trends of theoretical and applied research '2014: Proceedings of the International scientific and practical conference, Odessa, March 18–30, 2014*, pp. 63–70]

3. **Стохастическое** моделирование в машиностроении: учеб. пособие / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская, Ю. М. Быков. Волгоград: ВолгГТУ, 2002. 68 с. [J.L. Chigirinsky, N.V. Chigirinsky, J.M. Bykov, *Stochastic modeling in engineering, training manual* (in Russian). Volgograd: VSTU, 2002.]

4. **Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с. [Y.A. Evdokimov, V.I. Kolesnikov, A.I. Teterin, *Planning and analysis of experiments in solving problems of friction and wear*, (in Russian). Moscow: Science, 1980.]

ОБ АВТОРАХ

БОНДАРЕВ Александр Александрович, асп. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (ВолгГТУ, 2013). Готовит дис. в обл. повышения эффективности обработки резанием конструкционных углеродистых и легированных сталей с помощью опережающего пластического деформирования.

ОТЕНИЙ Ярослав Николаевич, зав. каф. технол. машиностроения и прикладной механики. Дипл. инж.-мех. (КПИ, 1976). Канд. техн. наук. (КМИ, 1988). Д-р техн. наук (РГТУ, 2008). Иссл. в обл. технол. качества и долговечности инструментов.

ЧИГИРИНСКИЙ Юлий Львович, доц. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-мех. (ВолгГТУ, 1981). Д-р техн. наук (СГТУ, 2015). Иссл. в обл. автоматиз. технол. подготовки машиностроит. пр-ва, физ. процессов при резании металлов, технол. методов обесп. качества изделий машиностроения.

КРАЙНЕВ Дмитрий Вадимович, доц. каф. технол. машиностроения. М-р техн. и технол. (ВолгГТУ, 2003). Канд. техн. наук (ВолгГТУ, 2006). Иссл. в обл. повышения эффективности обработки металлов резанием.

ИНГЕМАССОН Александр Рональдович, ст. препод., техн. и технол. (ВолгГТУ, 2009). Канд. техн. наук (ВолгГТУ, 2012). Иссл. в обл. повышения эффективности обработки металлов резанием.

METADATA

Title: Mathematical model for prediction lifetime of cutting tool in turning with advancing plastic deformation.

Authors: A. A. Bondarev, J. N. Oteniy, J. L. Chigirinsky, D. V. Krainev, A. R. Ingemansson.

Affiliation:

Kamyshin's technical institute (KTI), Russia.
Volgograd State Technical University (VSTU), Russia

Email: alexander_bondarev@mail.ru, oteniy3@rambler.ru, Julio-Tchigirinsky@yandex.ru, krainevdv@mail.ru, aleing@yandex.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 3 (69), pp. 16–20, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: A mathematical model, which predict a lifetime of cutting tool in turning with advancing plastic deformation (APD) on the workpiece surface, has been created. The regression analysis has allowed revealing the dependence of the response function and the influence of each factor on the function. The formula for calculation of the lifetime of cutting tool edge expanding possibilities of the turning with APD application in machining practice has been offered.

Key words: mathematical model; turning; wear; lifetime; cutting tool; advance plastic deformation (APD); carbide; structural steel; formula; calculation.

About authors:

BONDAREV, Aleksandr Aleksandrovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. Machinebuilding. Licensed manufacturing engineer (VSTU, 2013).

OTENIY, Yaroslav Nikolaevich, Attached to a chair Dept. of Machinebuilding. Dipl. Mechanical Engineer. Cand. of Tech. Sci. (KMI, 1988), Dr. of Tech. Sci. (RSTU, 2007).

CHIGIRINSKY, Juliy Lvovich, Assistant Prof. Dept. of Machinebuilding. Licensed manufacturing engineer (VSTU, 1981). Cand. of Tech. Sci. (SPI, 1990), Dr. of Tech. Sci. (SSTU, 2015).

KRAINEV, Dmitry Vadimovich, Assistant Prof., Dept. of Machinebuilding Volgograd State Technical University, Master of Technics and technology (VSTU, 2003), Cand. Of. Tech. Sci. (VSTU, 2006).

INGEMANSSON, Aleksandr Ronaldovich, Senior reader Dept. of Machinebuilding Volgograd State Technical University, Master of Technics and technology (VSTU, 2009), Cand. Of. Tech. Sci. (VSTU, 2012).