

УДК 621.7

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА И СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ВАЛОВ

*Аль-Обайди Луаи Мохаммед Раджаб, М. Е. Попов*

Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

В статье изложены основные особенности процесса обработки валов резанием, которые оказывают влияние на стойкость инструмента и, как следствие, на точность обработки. Цель данной работы — рассмотреть способы повышения работоспособности режущего инструмента на основе установления закономерностей связи физико-химических явлений, протекающих в контактных слоях инструмента на микро- и субмикромасштабном уровне в процессе резания, с интенсивностью его изнашивания в широком диапазоне условий резания.

**Ключевые слова:** обработка, инструмент, износ, валы, стойкость, скорость резания, температура.

UDC 621.7

## ACCOUNTING FOR THE EFFECTS OF WEAR AND TOOL LIFE FOR THE PRECISION MACHINING OF LONG SHAFTS

*Al-Obaidi Luay Mohammed Rajab, M. E. Popov*

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The article describes the main features of the shaft cutting process, which affect the tool life and, as a result, the accuracy of processing. The purpose of this article is to consider ways to improve the working activity of a cutting tool based on the establishment of regularities of physical and chemical phenomena connection occurring in the contact layers of the tool at the micro — and submicroscale level during cutting, with the intensity of its wear in a wide range of cutting conditions.

**Keywords:** processing, tool, wear, shafts, durability, cutting speed, temperature.

**Введение.** Детали, которые относятся к типу валов, находят широкое применение в машинах, механизмах и узлах. Их изготовление предполагает использование метода токарной обработки. В настоящее время изыскание путей повышения работоспособности рабочей части режущего инструмента ведётся по четырём основным направлениям: повышение износостойкости и теплоустойчивости инструментальных материалов; оптимизация геометрических параметров и режимов эксплуатации режущего инструмента; синтезирование эффективных составов смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) и способы их подачи в зону резания; модифицирование рабочих поверхностей инструмента методами предварительного упрочнения (ПУ) [1]. Наибольший эффект достигается при совместном использовании различных направлений повышения работоспособности режущего инструмента.

В работе проведен компьютерный корреляционный анализ полученных экспериментальных данных. На основе установленных физико-химических закономерностей структурных трансформаций в контактных слоях режущего инструмента, их влияния на интенсивность изнашивания сформулирован научный подход к разработке методов повышения работоспособности инструмента в существующих технологических процессах изготовления валов.

Рассмотрен характер изменения точности обработки во времени с учетом износа и стойкости инструмента. Предложены способы определения периодичности подналадки графическим и расчетно-аналитическим методами.

**Основная часть.** При разработке технологических процессов, связанных с обработкой валов путем точения с помощью твердосплавного инструмента, должно быть обеспечено высокое качество тех поверхностей, которые подвергаются обработке. Должны быть учтены такие параметры, как стабильность и предсказуемость размерного износа лезвия резца, шероховатость и точность. Кроме этого, необходимо учитывать производительность и ресурс работы инструмента, его максимальную стойкость.

Общеизвестным является факт, что показатели, которыми характеризуется работа инструмента, в значительной степени находятся в зависимости от того, какова скорость резания. Тем не менее, тот факт, что аналитическая зависимость, которая позволяет определить оптимальную величину скорости резания, отсутствует, назначение оптимальных режимов обработки на стадии проектирования не представляется возможным.

На основе изучения состояния рабочих поверхностей инструмента в течение периода стойкости выявлено, что в процессе резания в его контактных слоях происходит эволюция структуры инструментального материала, зависящая от скорости резания. Установлены физико-химические закономерности структурных трансформаций в контактных слоях режущего инструмента, их влияние на интенсивность изнашивания, позволившие сформулировать научный подход к разработке методов повышения работоспособности инструмента, создать ряд новых и усовершенствовать существующие технологические процессы изготовления валов.

Зависимость между периодом стойкости инструмента и скоростью резания в процессе обработки вала, изготовленного из стали марки ст. 45, с использованием инструмента, снабженного сменными пластинами из твердого сплава марки Т15К6, является периодически изменяющейся плавной кривой, которая имеет два или три максимума и минимума. Эти максимумы и минимумы разделяют точки перегиба, которые расположены на различных уровнях стойкости при использовании различных скоростей резания [2–3]. Данная зависимость представлена на рис. 1.

Было установлено, что наличие «горбов» имеет связь с тем, что существует переход физического процесса, который соответствует износу рабочей поверхности резца, в другой физический вид [4–6]. Наличие «горбов» в зависимости между периодом стойкости инструмента и скоростью резания в процессе обработки вала говорит о наступлении равновесного состояния в зоне резания при стружкообразовании, что связано со стабилизацией условий трения в контакте инструмента с поверхностью резания заготовки. В других точках кривой условия трения в зонах контакта являются нестабильными.

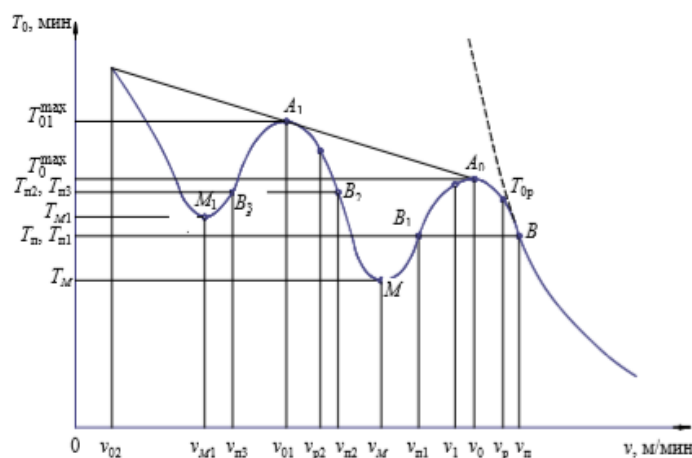


Рис. 1. Закономерности изменения периода стойкости лезвийного инструмента в зависимости от скорости резания

Исходя из условий, которые соответствуют процессу обработки, режущий инструмент может подвергаться следующим видам износа:

- механический;
- абразивный;
- адгезионный;
- окислительный, или химический;
- термоусталостный;
- диффузионный.

Процесс, связанный с износом, состоит из двух видов. Один из этих видов в определенный момент времени оказывает большее влияние, чем другой.

На рис. 1 в точках  $M_I$  ( $v_{MI}$ ,  $T_{MI}$ ) и  $M$  ( $v_M$ ,  $T_M$ ), которые расположены на кривой  $T_0 = f(v)$ , стойкость инструмента минимальна и обуславливается наличием адгезионного вида износа [7]. Адгезионный износ инструмента представляет собой циклический срез путем касательных напряжений или же отрыв силами адгезии, связанными с прилипанием, свариванием и сцеплением, частиц, которые соответствуют отдельным выступам разупрочненного инструментального материала стружкой, которая сходит с режущей кромки инструмента [8–9]. При использовании небольших скоростей резания ( $v < 10$  м/мин.), температуры резания, которая соответствует ( $\theta < 300^\circ\text{C}$ ), и большого давления процессы адгезии приводят к тому, что на передней поверхности резца образуются чистые от окислов элементарные поверхности, а также нарост. В образовавшемся наросте можно выделить две части:

- первая часть является неподвижной и «приваренной» к передней поверхности, которая соответствует «подошве»;
- вторая часть контактирует с «горячей» стружкой и приводит к срыву «шапки».

Когда скорость резания составляет  $v = 20\text{--}45$  м/мин., а температура равна  $\theta = 300^\circ\text{C}$ , высота нароста является максимальной, а износ в таком случае равен минимальному значению. Твердость, которая соответствует наросту, в данном случае в 2,5–3 раза больше, чем твердость того материала, который подвергается обработке. Применительно к режущему инструменту наросту соответствует функция режущего клина. Также он выполняет защитные функции, которые препятствуют износу контактных поверхностей инструмента. Максимальные значения достигают такие показатели, как шероховатость обработанной поверхности, передний фактический угол и стойкость инструмента [10]. Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что для чистовой обработки поверхности не рекомендуется такой диапазон скоростей резания, который приводит к образованию нароста. Когда скорость, соответствующая скорости резания, повышается до 40–50 м/мин., можно наблюдать рост температуры до уровней, которые соответствуют 300–600°C. Нарост при такой температуре исчезает. По причине абразивно-адгезионного износа происходит падение стойкости инструмента до момента, когда начинает образовываться окисная пленка, которая имеет ячеистый вид [11–13].

Если скорость, которая соответствует скорости резания, продолжает наращиваться ( $v > v_M$ ), то наблюдается повышение температуры в зоне резания. Пропорционально увеличению температуры изменяется характер физико-химической активности поверхностного слоя в зоне резания. Окисная пленка, которая располагается в зоне, где происходит процесс трения между заготовкой, стружкой и рабочими поверхностями лезвия инструмента, предотвращает возникновение между ними непосредственного контакта. Данный факт имеет положительное значение для повышения стойкости инструмента. В качестве окислительного износа принято рассматривать установившийся

ся стационарный процесс, связанный с динамическим равновесием между разрушением и восстановлением окисных пленок, где преобладает окисление.

Таким образом, исходя из сказанного выше, можно сделать вывод о том, что для того, чтобы увеличить период стойкости инструмента и, как следствие, точность обработки длинномерных валов, необходимо назначать такие режимы обработки, которые могут дать гарантию наличия окислительного износа, который должен иметь место между поверхностями стружки, заготовки и инструмента. Установлено, что повышение работоспособности режущего инструмента может быть достигнуто за счёт управления процессом изменения структуры в контактном слое инструмента в процессе резания [1].

Для учета влияния износа и стойкости инструмента на точность обработки длинномерных деталей строят теоретическую диаграмму достижения точности на технологическом переходе (рис. 2) [14–16].

Для наружных цилиндрических поверхностей теоретическую диаграмму достижения точности строят относительно радиального или диаметрального размера. Чаще всего строят относительно диаметрального размера, так как он совпадает с контролируемым операционным размером обрабатываемой детали.

1. По оси абсцисс откладывают суммарную длину пути резания или количество обработанных при неизменной наладке деталей  $N$  (шт.), по оси ординат — значение размера  $X$  (мм) поверхности обрабатываемой детали. Проводят сплошными линиями, параллельными оси абсцисс, предельные значения операционного размера  $A$ :

для цилиндрических наружных поверхностей отнесённые к радиусу соответственно  $X_{\min} = A_{\min}^e$  и  $X_{\max} = A_{\max}^e$  и отнесённые к диаметру соответственно  $X_{\min} = 2A_{\min}^e$  и  $X_{\max} = 2A_{\max}^e$ .

2. Проводят пунктирными линиями, параллельными оси абсцисс, верхнюю и нижнюю границы допустимых значений контролируемого размера:

для цилиндрических наружных поверхностей отнесённые к радиусу соответственно  $X_{кн} = A_{\min}^e + \Delta_n/2$  и  $X_{кв} = A_{\max}^e - \Delta_{изм}/2$  и отнесённые к диаметру соответственно  $X_{кн} = 2 \cdot (A_{\min}^e + \Delta_n/2)$  и  $X_{кв} = 2 \cdot (A_{\max}^e - \Delta_{изм}/2)$ .

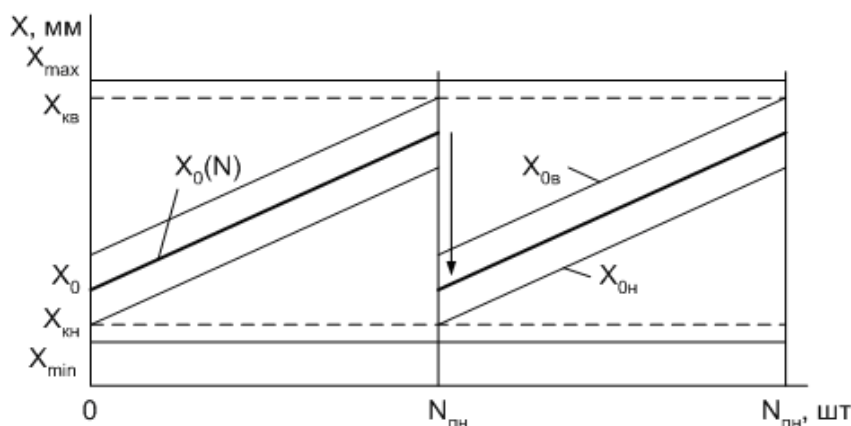


Рис. 2. Теоретическая диаграмма достижения точности на технологическом переходе для наружных поверхностей

3. Длину пути резания  $L_D$  при точении одной заготовки (м) определяют по формуле:

$$L_D = \frac{\pi D}{1000} \cdot \frac{l_D}{s},$$

где  $D$  — диаметр обрабатываемой поверхности, мм;

$l_D$  — длина обрабатываемой поверхности, мм;

$s$  — подача, мм/об.

4. Длина пути резания  $L_N$  для партии из  $N$  заготовок, обрабатываемых в период между подналадками станка, будет равна  $L_N = L_D \cdot N$ .

Для того чтобы учесть более интенсивное начальное изнашивание на первом участке кривой износа, условно увеличивают полученную расчётным путём длину пути резания на  $L_H = 1000$  м. Тогда полная длина пути резания для партии деталей  $L = L_N + L_H$ .

5. Приняв по нормативным или экспериментальным данным относительный размерный износ  $u_0$  (мкм/км) резца для данных условий выполнения операции, определяют размерный износ  $\Delta_{изн}$  (мм) при обработке партии деталей:

$$\Delta_{изн} = \frac{L}{1000000} \cdot u_0.$$

Ориентировочные значения относительного размерного износа  $u_0$  (мкм/км) резцов приведены в справочной литературе [14].

6. При построении теоретической диаграммы достижения точности номинальное значение уровня настройки наладочного размера  $X_0$  принимают равными:

для наружных цилиндрических поверхностей отнесённый к радиусу соответственно  $X_0 = A_{pn}^e$  и отнесённый к диаметру соответственно  $X_0 = 2A_{pn}^e$ .

Тогда смещение уровня настройки наладочного размера  $X_0(N)$ , вызванное размерным износом инструмента, в зависимости от количества обработанных деталей  $N$  для наружных цилиндрических поверхностей, отнесённое к радиусу соответственно  $X_0(N) = X_0 + \frac{L_D \cdot N + L_H}{1000000} \cdot u_0$  и отне-

сённое к диаметру соответственно  $X_0(N) = X_0 + 2 \cdot \frac{L_D \cdot N + L_H}{1000000} \cdot u_0$ .

7. Аналогичным образом получают зависимости верхнего  $X_{0e}$  допустимого и нижнего  $X_{0н}$  допустимого значения уровня настройки наладочного размера от количества обработанных деталей  $N$ .

Для наружных цилиндрических поверхностей отнесённые к радиусу соответственно

$$\text{для верхнего уровня } X_{0e}(N) = X_0 + \frac{L_D \cdot N + L_H}{1000000} \cdot u_0 + \frac{\omega_{pm}}{4};$$

$$\text{для нижнего уровня } X_{0н}(N) = X_0 + \frac{L_D \cdot N + L_H}{1000000} \cdot u_0 - \frac{\omega_{pm}}{4},$$

отнесённые к диаметру соответственно

для верхнего уровня  $X_{0в}(N) = X_0 + 2 \cdot \frac{L_d \cdot N + L_n}{1000000} \cdot u_0 + \frac{\omega_{рм}}{2}$ ;

для нижнего уровня  $X_{0н}(N) = X_0 + 2 \cdot \frac{L_d \cdot N + L_n}{1000000} \cdot u_0 - \frac{\omega_{рм}}{2}$ .

8. Нанеся на диаграмме линии уровней настройки наладочного размера  $X_0(N)$ ,  $X_{0в}(N)$  и  $X_{0н}(N)$ , получают теоретическую диаграмму достижения точности на технологическом переходе для наружных цилиндрических поверхностей (рис. 2).

Определяют периодичность подналадки  $N_{nn}$  графическим и расчётно-аналитическим методами.

При графическом методе периодичность проведения подналадки  $N_{nn}$  определяют по диаграмме достижения точности. Она будет соответствовать абсциссе  $X_{кн} = (A_{\max} - \Delta_{изм}/2)$  для наружных цилиндрических поверхностей.

Периодичность подналадки, т. е. количество деталей, обработанных между подналадками, можно определить и расчётным путём, приравняв значения  $X_{0в}(N)$  и  $X_{кв} = (A_{\max} - \Delta_{изм}/2)$  для наружных поверхностей. После преобразований получим для наружных цилиндрических поверхностей отнесённое соответственно к радиусу

$$N_{nn} = \frac{\left[ X_{\max} - X_0 - (\Delta_{изм} + \omega_{рм}/2) / 2 \right] \cdot 10^6}{u_0 \cdot L_d} - \frac{L_n}{L_d}$$

и отнесённое к диаметру

$$N_{nn} = \frac{\left[ X_{\max} - X_0 - (\Delta_{изм} + \omega_{рм}/2) \right] \cdot 10^6}{2 \cdot u_0 \cdot L_d} - \frac{L_n}{L_d}.$$

В условиях серийного производства, когда изготовление деталей производится партиями (сериями) по  $n$  штук, необходимость проведения подналадки в процессе изготовления партии деталей определяется из условия  $n > N_{nn}$ , а расчётное количество подналадок  $k_{nn}$  при обработке партии деталей будет равно  $K_{nn} = (n/N_{nn}) - 1$ .

**Заключение.** Трудность обработки таких деталей, как круглые стержни большой длины, связана с недостаточной жесткостью стержня, вследствие чего при обработке возникают значительные деформации детали. Кроме того, точность обработки зависит от начальных отклонений кривизны заготовки [1].

Таким образом, решение проблем, возникающих при изготовлении длинномерных валов, возможно путем выбора наилучшего способа установки заготовки на станке и расчета ее оптимальных припусков. Расчётные значения параметров наладки следует использовать при освоении производства изделий. В процессе производства расчётные данные могут корректироваться с учётом конкретных условий производства и фактических результатов процесса обработки деталей.

Предложенные в данной статье методы универсальны и могут применяться к любым деталям данного класса.

### Библиографический список

1. Куликов, М. Ю. Разработка способов повышения работоспособности режущего инструмента на основе анализа механизмов его микро- и субмикроразрушения : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / М. Ю. Куликов [Электронный ресурс] / Техносфера. — URL : <http://tekhnosfera.com/razrabotka-sposobov-povysheniya-rabotosposobnosti-rezhushchego-instrumenta-na-osnove-analiza-mehanizmov-ego-mikro-i-submikro> (дата обращения : 09.03.2020).
2. Ящерицын, П. И. Теория резания : учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. — 2-е изд., испр. — Минск : Новое знание, 2007. — 512 с.
3. Резание материалов. Режущий инструмент. В 2 ч. Часть 1 : учебник для СПО ; под общ. ред. Н. А. Чемборисова. — Москва : Юрайт, 2017. — 263 с.
4. Резание материалов. Режущий инструмент. В 2 ч. Часть 2 : учебник для академического бакалавриата ; под общ. ред. Н. А. Чемборисова. — Москва : Юрайт, 2017. — 246 с.
5. Кожевников, Д. В. Резание материалов / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов ; изд-е 2-е, доп. — Москва : Машиностроение, 2012. — 304 с.
6. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. — Москва : Машиностроение, 2009. — 640 с.
7. Железнов, Г. С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов / Г. С. Железнов, А. Г. Схиртладзе. — Старый Оскол : ТНТ, 2011. — 456 с.
8. Копылов, В. В. Моделирование и расчет стойкости сборного инструмента / В. В. Копылов // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. — 2004. — № 2. — С. 94–99.
9. Рогов, В. А. Исследование характеристик комбинированных державок резцов на физических моделях / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк // СТИН. — 2003. — № 2. — С. 19–22.
10. Дунаев, П. Ф. Расчет допусков размеров / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. — Москва : Машиностроение, 1981. — 189 с.
11. Пашкевич, В. М. Многофакторная оптимизация параметров механической обработки на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестник Белорус.-Рос. ун-та. — 2011. — № 4 (33). — С. 51–61.
12. Пашкевич, В. М. Оптимизация режимов резания на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2011. — № 3. — С. 9–12.
13. Жолобов, А. А. Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления : монография / А. А. Жолобов. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. — 304 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1. Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. — Москва : Машиностроение, 1985. — 657 с.
15. Попов, М. Е. Управление точностью технологического размера при изготовлении деталей на металлорежущих станках : Учебное пособие / М. Е. Попов, А. М. Попов. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ. — 2005. — 203 с.

16. Попов, М. Е. Проектирование операций обработки деталей на токарных станках с ЧПУ : Учебное пособие / М. Е. Попов, А. М. Попов. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ. — 2002. — 112 с.

*Об авторах:*

**Аль-Обайди Луаи Мохаммед Раджаб**, аспирант Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [luayrajab@yahoo.com](mailto:luayrajab@yahoo.com)

**Попов Михаил Егорович**, профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор [pme-dgtu@mail.ru](mailto:pme-dgtu@mail.ru)

*Authors:*

**Al'-Obaidi Luai Mokhammed Radzhab**, undergraduate student of Don State Technical University (344000, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarina sq. 1), [luayrajab@yahoo.com](mailto:luayrajab@yahoo.com)

**Popov Mikhail Egorovich**, Professor, the Department of "Engineering Technology", Don State Technical University (344000, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarina sq. 1), [pme-dgtu@mail.ru](mailto:pme-dgtu@mail.ru)