

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Е.С. Янов, А.В. Анцев, М.С. Воротилин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА  
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
НА ВИБРАЦИЮ ТОНКОСТЕННЫХ  
ЗАГОТОВОК ПРИ ТОЧЕНИИ**

Тула  
Издательство ТулГУ  
2024

УДК 621.941.1:681.518.3

ББК 34.63

Я64

**Рецензенты:**

*Е.В. Артамонов*, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Станки и инструменты» Тюменского индустриального университета, заслуженный работник высшей школы РФ;

*Е.И. Минаков*, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Радиоэлектроника» Тульского государственного университета

**Янов Е.С.**

Я64 Исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию тонкостенных заготовок при точении : монография / Е.С. Янов, А.В. Анцев, М.С. Воротилин. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2024. – 173 с.

ISBN 978-5-7679-5398-1

Предложена методика оптимизации технологического процесса точения на основе уровня вибрации в процессе обработки. Рассматриваются вопросы контроля состояния режущего инструмента в процессе обработки. Предложена система мониторинга протекания процессов механической обработки по уровню вибрации технологической системы. С использованием данной системы мониторинга проведено исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию тонкостенных заготовок при точении. Представлен практический пример оптимизации технологического процесса на основе уровня вибрации в процессе обработки.

Рассчитана на студентов высших учебных заведений, обучающихся в бакалавриате и магистратуре по направлениям подготовки «Машиностроение», «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», а также может быть полезна студентам вузов других специальностей и направлений подготовки, инженерно-техническим работникам и другим читателям, интересующимся вопросами разработки технологий и эксплуатации оборудования механической и физико-технической обработки.

УДК 621.941.1:681.518.3

ББК 34.63

ISBN 978-5-7679-5398-1

© Янов Е.С., Анцев А.В., Воротилин М.С., 2024

© Издательство ТулГУ, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОПРОСЕ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	9
1.1 Анализ способов контроля состояния режущего инструмента ....	9
1.2 Мониторинг износа режущего инструмента на основе потребляемого тока.....	12
1.3 Мониторинг износа режущего инструмента на основе прямого контроля размерного износа .....	20
1.4 Мониторинг износа режущего инструмента на основе контроля уровня вибрации.....	23
2 ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ .....	37
2.1 Информационно-измерительные системы мониторинга работы станочного парка предприятия.....	37
2.2 Концепция информационно-измерительной системы контроля технологического оборудования .....	42
2.3 Система мониторинга протекания процессов механической обработки и предиктивной аналитики состояния технологической системы .....	49
3 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ВИБРАЦИЮ ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ТОЧЕНИИ.....	54
3.1 Описание примера технологического процесса .....	54
3.2 Исследование технологического процесса обработки детали «Корпус» тип 1 .....	55
3.3 Исследование технологического процесса обработки детали «Корпус» тип 2 .....	57
3.3.1 Разрушение режущей пластины .....	60
3.3.2 Изменение режимов резания оператором .....	62
3.3.3 Биение заготовки.....	63
3.3.4 Ослабление крепления электродвигателя привода главного движения.....	63
3.3.5 Отключение СОЖ во время обработки .....	64
3.4 Влияние износа режущего инструмента на уровень вибрации при точении заготовок.....	65
3.4.1 Черновое внутреннее растачивание .....	71
3.4.2 Чистовое внутреннее растачивание .....	77
3.4.3 Точение внутренней канавки.....	82

# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОПРОСЕ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

## 1.1 Анализ способов контроля состояния режущего инструмента

Исследованиями процессов механической обработки в целях определения условий обработки лезвийным инструментом, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, надежности, качества и экономичности обработки, в Тульском государственном университете занимались Бобков М.Н., Бобров В.Ф., Борискин О.И., Васин Л.А., Васин С.А., Иванов В.В., Иноземцев А.Н., Коганов И.А., Лашнев С.И., Пасько Н.И., Петрухин С.С., Протасьев В.Б., Ушаков М.В., Федин Е.И., Феофилов Н.Д., Хлудов С.Я., Шадский Г.В., Шейнин Г.М., Ямников А.С., Ямникова О.А. и др. ученые. В современной научной литературе контролю состояния режущего инструмента посвящено достаточное количество работ как российских, так и зарубежных авторов [1–11]. В частности, в [12] приведены обзоры, наилучшим образом раскрывающие современное состояние данного вопроса, который продолжает быть актуальным даже в условиях современного автоматизированного производства, где согласно исследованиям как российских, так и зарубежных ученых, приведенным в [9, 13], доля простоя технологического оборудования, вызванного поломкой режущего инструмента, достигает 20 %.

Анализ литературных источников о методах контроля состояния режущего инструмента, приведенный в [12], позволяет разделить их на 2 основные группы:

- а) методы прямого периодического контроля режущего инструмента;
- б) методы непрерывного косвенного контроля режущего инструмента.

Классификация методов контроля состояния режущего инструмента приведена на рисунке 1.1.

Прямой контроль износа режущего инструмента предусматривает непосредственное контролирование износа, под которым может пониматься: изменение размеров лунки (длины, ширины, глубины), образующейся на передней поверхности инструмента; изменение массы выкрошенного материала инструмента; изменение ширины ленточки износа инструмента по задней поверхности и т. д. Определение данных параметров может происходить одним из следующих методов:

- электромеханическим [14, 15];
- радиоактивным [16];
- пневматическим [3];
- методом технического зрения (оптическим) [17–22];
- ультразвуковым [23, 24];
- индуктивным [25];
- лазерным сканированием [17, 26].

подобраны таким образом, что время обработки обеспечивает равномерную загрузку металлорежущего станка. При указанных выше режимах резания период стойкости лезвийного инструмента составляет 145-150 мин. Обоснованием для замены сменной твердосплавной пластины служил её визуальный осмотр оператором, а также увеличение шероховатости получаемой поверхности. В чертеже на обрабатываемую деталь заложена шероховатость обрабатываемой поверхности Ra 3,2. Её замер на ранее обработанных деталях показал, что фактически она составляет 0,28-0,31 мкм.

Для выявления постоянной составляющей нагрузки на шпиндель, обусловленной поддержанием заданной частоты вращения, был выполнен её замер на холостых ходах. Результаты замера показали, что при частоте вращения 1000 об/мин нагрузка составляет 4 %. В таблице 1.1 представлены результаты замера нагрузки на шпиндель, полученные при обработке партии деталей.

Таблица 1.1 – Результаты измерения нагрузки на шпиндель, полученные при обработке первой партии деталей

№ детали	Скорость резания, м/мин	Минутная подача, мм/мин	Шероховатость поверхности, мкм	Замер нагрузки на шпиндель, %				
				№ замера				
				1	2	3	4	5
1	252	300	0,26	12%	11%	12%	12%	12%
2	252	300	0,26	10%	12%	11%	10%	10%
3	252	300	0,26	11%	10%	11%	12%	10%
4	252	300	0,25	12%	10%	10%	10%	10%
5	252	300	0,25	12%	10%	10%	10%	10%
6	252	300	0,27	14%	13%	13%	14%	13%
7	252	300	0,26	14%	13%	13%	14%	13%
8	252	300	0,27	13%	13%	13%	13%	13%
9	252	300	0,27	14%	13%	14%	14%	13%
10	252	300	0,27	14%	14%	14%	14%	14%

После обработки партии деталей, состоящей из 10 штук, был проведен замер износа режущей кромки у пластин. Машинное время обработки одной детали составляет 14 мин. Визуальный осмотр пластин, проработавших 140 мин, показал, что на них наблюдается равномерный износ задней поверхности. Результаты показали, что его среднее значение износа по задней поверхности составляет 0,05 мм. Замер шероховатости обработанной поверхности показал её значение, равное 0,27 мкм. Таким образом, по результатам обработки первой партии деталей было установлено, что ресурс лезвийного инструмента использован не полностью, а следовательно, зависимость изменения нагрузки от износа

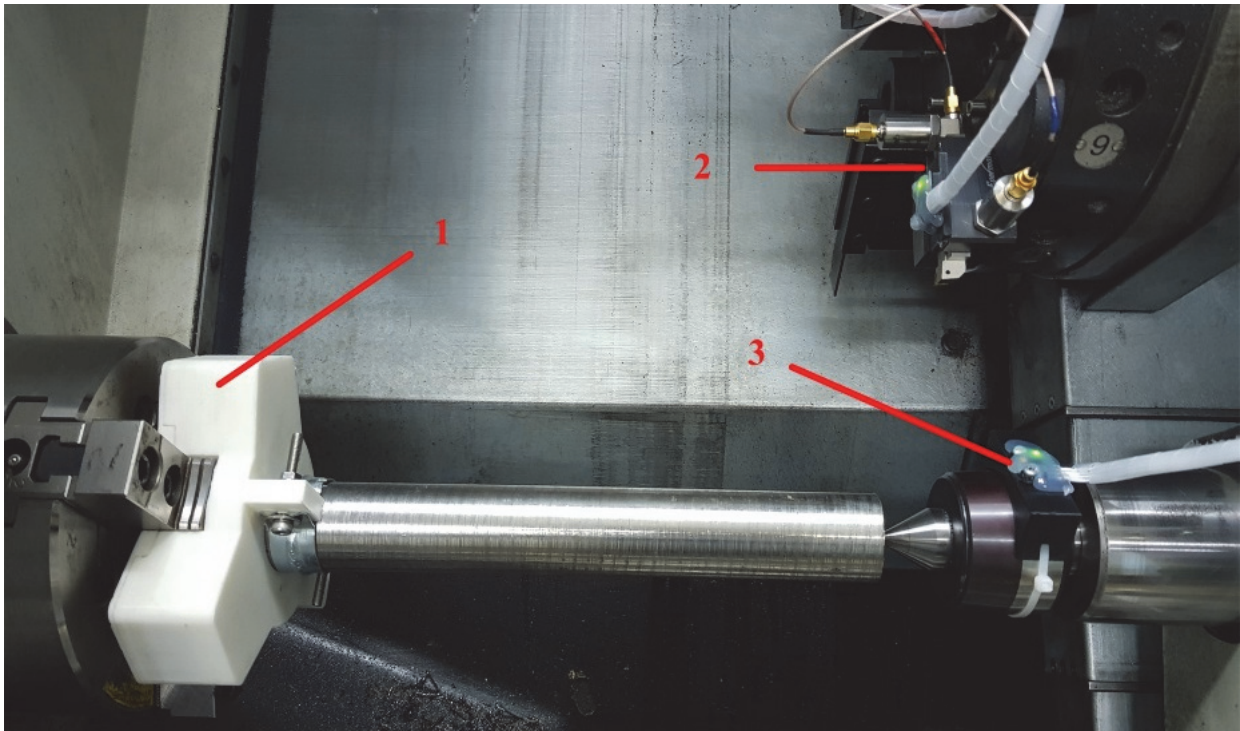


Рисунок 1.15 – Измерительная установка контроля вибрации при токарной обработке:

1 – ротационный датчик вибрации, 2 – резцедержатель с акселерометром и виброметрами, 3 – задняя бабка с акселерометром

Собранные с датчиков сигналы должны пройти ряд обработок для их преобразования в удобный для анализа вид [95].

Первоначальная обработка исходного сигнала состоит в удалении из него ускорения свободного падения  $g$ , постоянно влияющего на акселерометры. При этом влияние ускорения свободного падения  $g$  зависит от расположения датчика. В простейшем случае датчик расположен неподвижно и одна из его осей расположена параллельно вектору ускорения свободного падения (рисунок 1.16). Такое размещение датчика возможно на державке резца в револьверной головке, на задней бабке и на станине станка. В этом случае колебания технологической системы могут быть пересчитаны из показаний датчика следующим образом:

$$\begin{aligned} a_x' &= a_x; \\ a_y' &= a_y; \\ a_z' &= a_z - g, \end{aligned} \tag{1.7}$$

где  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  – показания акселерометра,  $a_x'$ ,  $a_y'$ ,  $a_z'$  – колебания технологической системы.

На многих токарных станках ось  $X$  находится под углом  $\alpha_x$  к поверхности направляющих. В этом случае воздействие ускорения свободного падения  $g$  распределяется на две оси акселерометра (рисунок 1.17).

10) пик-коэффициент (crest factor).

Амплитудой сигнала является наибольшее мгновенное значение сигнала на протяжении всего интервала времени наблюдения

$$X_{\max} = \max(x_i), \quad (3.1)$$

где  $x_i$  – мгновенное значение сигнала в  $i$ -й момент времени.

Среднее значение сигнала рассчитывается по формуле

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.2)$$

Среднее квадратическое – это число, равное квадратному корню из среднего арифметического квадратов значений сигнала. Для набора показаний количеством  $n$  среднеквадратичное значение (RMS) определяется указанным выражением:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (3.3)$$

Среднеквадратичное значение применяется в расчётах, где существует пропорциональная зависимость не самих переменных значений, а их квадратов.

Дисперсия – математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от её математического ожидания – рассчитывается как

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}. \quad (3.4)$$

Дисперсия – мера разброса значений случайной величины относительно её математического ожидания. Она показывает, насколько в среднем значения сосредоточены, сгруппированы. Если дисперсия маленькая, то значения сравнительно близки друг к другу, если большая – далеки друг от друга.

Среднеквадратичное отклонение определяется как квадратный корень из дисперсии случайной величины:

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}}. \quad (3.5)$$

Среднеквадратичное отклонение является наиболее распространённым показателем рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания.

Коэффициент вариации считается как отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению:

$$K_v = \frac{\sigma}{\mu}. \quad (3.6)$$

Коэффициентом вариации является мера разброса случайной величины. Она показывает, какую долю средний разброс составляет от среднего значения случайной величины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веттегрень В.И. Спектроскопическое изучение разрушающих флуктуаций плотность // Физика прочности и пластичности. Л.: Наука. 1986. С. 17–27.
2. Зориктуев В.Ц. Идентификация и оптимальное управление автоматизированными технологическими системами: учеб. пособие. Уфа : УАИ, 1992. 118 с.
3. Кретинин О.В. Исследование спектра термоЭДС и сил при резании // Труды ГПИ (Горький). 1970. Вып. 4. Т. 26. С. 17–18.
4. Подураев В.Н., Барзов А.А., Горелов В.А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 1988. 56 с.
5. Система комплексного контроля инструмента для токарной обработки // Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Сер. 2. Режущие инструменты. М.: Машиностроение, 1987. Вып. 9. С. 1–7.
6. Ghasempoor A., Moore T.N., Jeswiet J. On-line wear estimation using neural networks // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1998. Vol. 212. P. 105–112.
7. Maydl W., Sick B. Recurrent and non-recurrent dynamic network paradigms: A case study // International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 2000. Vol. 6. P. 73–78.
8. Pittner S., Kamarthi S.V., Gao Q. Wavelet networks for sensor signal classification in flank wear assessment // Journal of Intelligent Manufacturing. 1998. Vol. 9. P. 315–322.
9. The adaptability of a tool wear monitoring system under changing cutting conditions / R.G. Silva [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. 2000. Vol. 14. P. 287–298.
10. Liang S.Y., Hecker R.L., Landers R.G. Machining process monitoring and control: the state-of-the-art // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. 2004. Vol. 126. Issue 2. P. 297–310.
11. Cutting tools reliability and residual life prediction from degradation indicators in turning process / C. Letot, R. Serra, M. Dossevi, P. Dehombreux // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 86. P. 495–506. DOI: 10.1007/s00170-015-8158-z.
12. Сидоров А.С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Сидоров Александр Сергеевич. Уфа, 2007. 201 с.
13. Ильин А.Н. Разработка системы оперативной диагностики режущего инструмента по электрическим параметрам процесса резания: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Ильин Александр Николаевич. Уфа, 2000. 191 с.
14. Кибальченко А.В. Контроль состояния режущего инструмента: обзорная информация. Выпуск 2. М.: ВНИИТЭМП, 1986. 42 с.



Научное издание

**Янов Евгений Сергеевич**  
**Анцев Александр Витальевич**  
**Воротилин Михаил Сергеевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА  
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
НА ВИБРАЦИЮ ТОНКОСТЕННЫХ  
ЗАГОТОВОК ПРИ ТОЧЕНИИ**

Монография

Авторское редактирование

Принято 05.03.2024. Подписано в печать 19.03.24  
Формат бумаги 70×100<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная  
Усл. печ. л. 14,05  
Тираж 500 экз. Заказ 023

Тульский государственный университет  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано в Издательстве ТулГУ  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95