

цесса шевингования-прикатывания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 283 – 286.

20. Кораблев А.И., Решетов Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1968. 288 с.

21. Зубчатые передачи: справочник. 2 изд. перераб. и доп. / Е.Г. Гринбург, Н.Ф. Голованов, Н.Б. Фируз, Н.Т. Хабачевский. Под общ. ред. Е.Г. Гринбурга. М.: Машиностроение, 1980. 416 с.

22. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машгиз, 1962. 952 с.

23. Марков А.Л. Измерение зубчатых колес. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1977. 240 с.

24. Болотовский И.А. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых передач: справочник / Под общ. ред. И.А. Болотовского – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.

25. Coatings for cutting tools // Station coating: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.stationcoating.com/en/coatings/coatings-cutting-tools> (дата обращения: 11.07.2022).

26. Narasimha M., Tewodros D., Rejikumar R. Improving wear resistance of cutting tool by coating // IOSR Journal of engineering. 2014. V 4 (5). P. 6-14.

27. Sarwar M., Haider J. Development of advanced surface engineering technologies for the benefit of multipoint cutting tools // Advanced Materials Research. 2008. P. 1043-1050.

Ковалев Юрий Вячеславович, аспирант, [y@ykov.me](mailto:y@ykov.me), Россия, Тула, Тульский государственный университет

#### FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF PHYSICAL MODELING OF THE PROCESS SHAVE-ROLLING OF CYLINDRICAL GEARS

Y.V. Kovalev

*The article considers the main aspects of constructing a procedure for modeling the process of shave-rolling cylindrical gears in order to determine the nature and features of the processes of cutting and surface plastic deformation in a tool-workpiece pair. The study will allow us to consider the main patterns of the development and course of these processes, depending on the main design parameters of the gear being processed, the tool and the technological parameters of the combined gear processing process. Considerable attention is paid to approaches to modeling the cutting-deforming process of tooth processing. The necessity of a fractional study of the operation of tool teeth occurring in unfavorable conditions from the point of view of cutting theory is substantiated.*

*Key words: shave-rolling, cylindrical gears, process, modeling, efficiency.*

*Kovalev Yuri Vyacheslavovich, postgraduate, [y@ykov.me](mailto:y@ykov.me), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 621.91.01

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-491-495

#### ИЗМЕРЕНИЯ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

А.С. Ямников, Е.Ю. Кузнецов, А.А. Маликов, А.В. Сидоркин

*В настоящей статье показан вариант использования встроенных средств измерения мощности, потребляемой приводом главного движения станка с ЧПУ для проведения в производственных условиях оценки силовых характеристик процесса резания. Существенное внимание уделено описанию процедуры выбора применяемых устройств и оценке степени адекватности их показаний.*

*Ключевые слова: силы резания, процесс, точение, лодметр, load meter, силовые характеристики.*

Для проведения в производственных условиях измерений, связанных с определением силовых характеристик процесса резания, предлагается пользоваться показаниями встроенного индикатора нагрузки двигателя – лодметра (англ. *load meter*). Для нанесения шкалы соответствия между определенным показанием лодметра и значением измеряемой величины (момента) то есть для тарирования показаний лодметра была реализована последовательность действий, изложенная ниже.

Лабораторная экспериментальная установка. На лабораторной экспериментальной установке, представленной на рис. 1, была обработана эталонная тарирующая заготовка, изготовленная из стали 45 ГОСТ 1055-88 резцом M02L012520M08 (РФ) с механическим креплением режущей сменной многогранной пластины (СМП) *WNMG 080408 PC TT8125 (TaeguTec Южная Корея)*, без применения СОЖ.

Для этого эталонную тарирующую заготовку 1 (см. рис. 1) устанавливают в патрон станка и поджимают задним центром – 6, установленным в пиноли задней бабки для обеспечения большей жесткости технологической системы и меньшего влияния последней на точность.

В процессе обработки эталонной тарирующей заготовки на экспериментальной установке для определения эталонной нагрузки, силы резания, возникающие в паре инструмент-заготовка, передаются на державку – 4 (см. рис. 1) и воспринимаются тензодатчиками динамометра – 5 (включенными по полумостовой параметрической схеме), преобразуются в напряжение и усиливаются измерительным усилителем – 6 (оснащенным вторыми половинами мостов и средствами грубой и точной балансировки «нуля» мостов). Далее усиленный сигнал поступает на вход *USB*-осциллографа – 7, являющегося по сути АЦП с развитым программным интерфейсом, реализованным в виде пакет прикладных программ «*USB*-осциллограф». Оцифрованные результаты измерений напряжения, пропорционального величине момента, возникающего в паре инструмент-заготовка, передаются по *USB*-интерфейсу на ПЭВМ – 8 форм-фактора «ноутбук».

Питание измерительного усилителя осуществляется от встроенного высокостабильного блока питания, обеспечивающего также запитку тензодатчиков измерительных полумостов динамометра, при этом гарантируются высокие точностные показатели работы измерительной схемы. Во избежание возникновения помех и наводок все тракты измерительной системы соединены между собой экранированными кабелями, а корпуса измерительных приборов и устройств экранированы и заземлены.



**Рис. 1. Общий вид лабораторной экспериментальной установки для определения эталонной нагрузки: 1 – токарно-винторезный станок 16К20; 2 – патрон трехкулачковый с установленной в нем эталонной тарирующей заготовкой – 3; 4 – резец; 5 – динамометр УДМ-600, установленный на поперечном суппорте станка; 6 – измерительный усилитель МДУ-8; 7 – *USB*-осциллограф *Disco*, оснащенный аналогово-цифровым преобразователем (АЦП); 8 – ПЭВМ типа «ноутбук», оснащенная программой «*USB*-осциллограф»**

Фотография зоны обработки эталонной тарирующей заготовки, представлена на рис. 1. Тарирование проводилось в двух направлениях: вначале была произведена запись значений крутящих моментов и отклонений «пера индикатора» при нарастающих величинах. Дойдя до максимального значения крутящего момента, тарирование было продолжено при убывающих значениях, что также было учтено при назначении режимов резания.

Полученные показания динамометра были приняты как эталонная нагрузка при тарировании лодметра.

Под термином эталонная тарирующая заготовка, используемом в рамках данной публикации, будем понимать единую заготовку, обрабатываемую на лабораторной экспериментальной установке, для определения величин моментов, возникающих при обработке конкретного материала (материал эталонной тарирующей заготовки, по возможности, выбирается таким же, как и материал измеряемой заготовки), и на промышленной экспериментальной установке для тарирования показаний лодметра. Использование эталонной тарирующей заготовки при тарировании лодметра позволяет исключить отклонения в химическом составе материала при его соответствии ГОСТу, то есть является одной из мер принимаемых для максимальной точности результатов, получаемых при проводимом однофакторном эксперименте, а тарирование до и после проведения каждой серии опытов позволит исключить непостоянство условий проведения экспериментов связанных с потерями на трение в узлах (непостоянство сил трения в узлах зависит от наличия слоя смазки, его толщины, вязкости, зазоров, температуры узлов трения и так далее), непостоянством микроклимата, в условиях которого проводятся эксперименты и так далее.

Промышленная экспериментальная установка. Базовым элементом промышленной экспериментальной установки является токарный обрабатывающий центр *TNL-85 A2 (TONGTAI MACHINE&TOOL CO., LTD. Тайвань)* [1]. Общий вид установки представлен на рис. 2, а ее схема на рис. 3. На данных рисунках позициями обозначены: 1 – токарный обрабатывающий центр *TNL-85 A2*; 2 – патрон цанговый *173E Quadro NC MARQUART* (Германия) с установленной в нем заготовкой-прутком 3; 4 – резцовая головка с установленным в ней режущим инструментом – резцом *R166OFG-4040 27* с СМП *TMR166G02-314-416255* производства фирмы *Sandvik Coromant* (Швеция); 8 – двигатель *Fanic α15/6000ip* (Япония); 7 – система измерения тока (СИТ) лодметра; 6 – *USB-осциллограф Disco*, оснащенный аналогово-цифровым преобразователем (АЦП); 5 – ПЭВМ.

В процессе обработки силы резания, возникающие в паре инструмент-заготовка, выражаются в изменении момента на шпинделе (валу нагрузки) прямо пропорциональном изменению токопотребления исполнительным двигателем. СИТ (система измерения тока) фиксирует это изменение, и преобразует в аналоговый сигнал, который поступает на вход осциллографа. Осциллограф оцифровывает полученный сигнал и передает отсчеты на вход ПЭВМ. Полученные данные обрабатываются программой «*USB-осциллограф*» [2].



Рис. 2. Общий вид промышленной экспериментальной установки для многопроходного нарезания витков червяков резцом

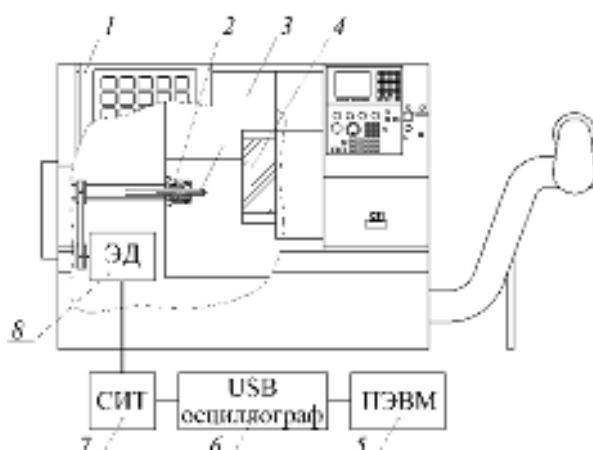


Рис. 3. Схема промышленной экспериментальной установки для многопроходного нарезания витков червяков резцом

Оцифрованные результаты измерений напряжения, пропорциональные величине силы резания, возникающей в паре инструмент-заготовка, передаются по *USB-интерфейсу* на – ПЭВМ 5. Эти результаты могут быть просмотрены в режиме «Цифрового осциллографа». Для осуществления контроля рассматриваемых параметров на протяжении всего цикла обработки использовался режим «Самописец», позволяющий сохранять данные в цифровом формате.

Во избежание возникновения помех и наводок все тракты измерительной системы соединены между собой экранированными кабелями, а корпуса измерительных приборов и устройств экранированы и заземлены.

Тарирование лодметра проводили на экспериментальной установке, при тех же условиях и режимах резания, при которых определялась эталонная нагрузка (в обоих случаях обработка велась без применения СОЖ, а для постоянства факторов эксперимента, связанных с геометрическими параметрами инструмента, материалом и износом режущей части инструмента (СМП) применялся единый резец и единая СМП при этом при каждой серии опытов СМП устанавливалась на новую грань).

При назначении режимов резания руководствовались следующими соображениями:

- реализуемость режимов на выбранном оборудовании (данный критерий касается в первую очередь универсального оборудования, имеющего дискретное назначение подач и частот вращения заготовки);

- рекомендации фирмы-изготовителя СМП [3];
  - охват всего диапазона показаний лодметра (предварительная оценка производилась по показаниям индикатора встроенного в станок);
  - равенство частоты вращения эталонной тарирующей заготовки при тарировании частоте вращения заготовки при многопроходном нарезании витков червяков в производственных условиях.
- Показания лодметра для каждой из выбранных частот заносились в соответствующие таблицы по данным которых была составлена тарирующая характеристика лодметра – рис. 4.

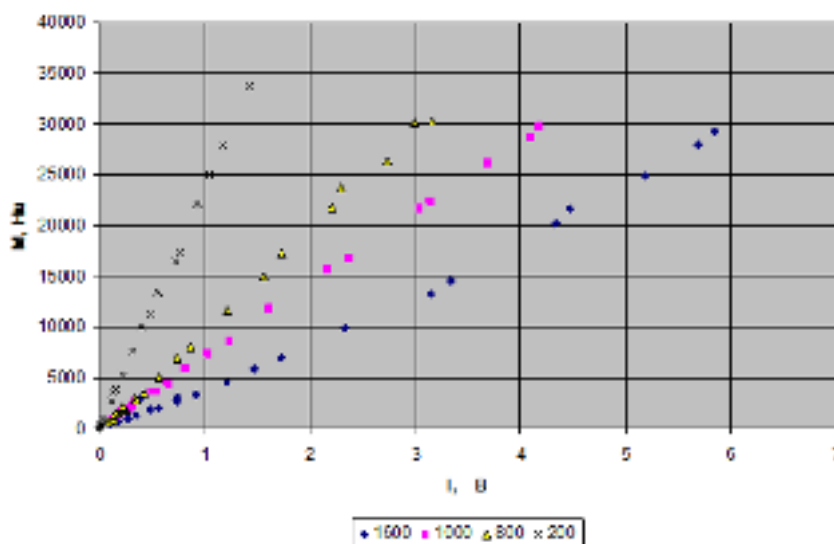


Рис. 4. Тарирующая характеристика лодметра

Анализ полученной графической зависимости позволяет сделать вывод, что тарирующая характеристика лодметра для каждой частоты вращения шпинделя линейна (см. рис. 4), но при этом имеет различный угол подъема.

При этом коэффициент достоверности аппроксимации, проводимой по методу наименьших квадратов,  $R^2=0,9903$ , свидетельствует о незначительных величинах нелинейных искажений в измерительном тракте лодметра, что в совокупности с использованием в качестве конечного звена рассматриваемого измерительного комплекса точного цифрового измерительного прибора (осциллографа) гарантирует высокую точность и достоверность результатов измерений.

#### Список литературы

1. Токарный обрабатывающий центр TNL-85АП, TNL-100АП. Руководство по эксплуатации. Тайвань. 179 с.
2. USB-осциллограф DISCO // ООО "Мотор-Мастер" 2006. [Электронный ресурс] URL: [https://motor-master.ru/downloads/disco\\_mt\\_manual.pdf](https://motor-master.ru/downloads/disco_mt_manual.pdf) (дата обращения: 16.03.2023).
3. TT8125 AlphaAL The next generation CVD coated grade TT8125 for steels // NPA New product announcement TaeguTurn TaeguTec №105: сетевой журн. 2009. [Электронный ресурс] URL: [http://www.taegutec.com/Img/Board\\_NPAFile/NPA105\\_en.pdf](http://www.taegutec.com/Img/Board_NPAFile/NPA105_en.pdf) (дата обращения: 15.03.2023).

Ямников Александр Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, [yamnikovas@mail.ru](mailto:yamnikovas@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Кузнецов Евгений Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, [ke2007@mail.ru](mailto:ke2007@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Маликов Андрей Андреевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, [ppizi@yandex.ru](mailto:ppizi@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сидоркин Андрей Викторович, канд. техн. наук, доцент, [alan-a@mail.ru](mailto:alan-a@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет

MEASUREMENTS OF THE POWER CHARACTERISTICS OF THE CUTTING PROCESS IN PRODUCTION CONDITIONS

A.S. Yamnikov, E.U. Kuznetsov, A.A. Malikov, A.V. Sidorkin

*This article shows a variant of using the built-in means of measuring the power consumed by the drive of the main movement of the CNC machine for conducting an assessment of the power characteristics of the transformation process in production conditions. Considerable attention is paid to the description of the procedure for selecting the devices used and assessing the degree of adequacy of their indications.*

*Key words: cutting forces, process, turning, crowbar, load meter, power characteristics.*

*Yamnikov Alexandr Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, [yamnikovas@mail.ru](mailto:yamnikovas@mail.ru), Russia, Tula State University,*

*Kuznetsov Evgeny Urevich, candidate of technical science, docent, [ke2007@mail.ru](mailto:ke2007@mail.ru), Russia, Tula State University,*

*Malikov Andrey Andreevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, [tppizi@yandex.ru](mailto:tppizi@yandex.ru), Russia, Tula State University,*

*Sidorkin Andrey Vistrovich, candidate of technical science, docent, [alan-a@mail.ru](mailto:alan-a@mail.ru), Russia, Tula State University*

УДК 621.7.01

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-495-501

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИХРЕВОМ РАСТАЧИВАНИИ

В.В. Куц, Т.А. Толмачева

*В статье приведен анализ методов растачивания отверстий. Рассмотрен метод вихревого растачивания вращающимся несоосно обрабатываемому отверстию резцовым блоком, который обеспечивает высокие показатели по производительности, износостойкости инструмента и качество получаемой поверхности. Процесс вихревой обработки подразумевает периодическое резание, в результате чего осуществляется разделение стружки на отдельные фрагменты. В статье рассмотрен вопрос влияния параметров режимов резания на шероховатость при вихревом растачивании. Представлена принципиальная схема вихревого растачивания. Показана конструкция резцового блока. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса вихревого растачивания отверстия. Получены и исследованы математические зависимости для определения влияния конструктивных параметров резцового блока, режимов обработки на величину шероховатости, с целью обеспечения требуемого показателя качества обработанной поверхности. Представлены формулы для определения параметра шероховатости  $R_a$  и максимальной высоты остаточного гребешка шероховатости  $R_z$ , с помощью которых можно определить закономерности формирования шероховатости получаемой поверхности в процессе вихревого растачивания и назначить режимы обработки детали, обеспечивающие необходимую величину шероховатости. Построены графики зависимости величины среднего арифметического отклонения профиля шероховатости ( $R_a$ ) от числа оборотов резцового блока  $N_b$ .*

*Ключевые слова: вихревое растачивание отверстий, резцовый блок, шероховатость поверхности.*

Из всех разновидностей обработки деталей резанием наиболее сложной и трудоемкой является расточка резцом глубоких отверстий, в процессе чего происходит непрерывный контакт режущего клина инструмента со сбегавшей стружкой, что повышает температуру в зоне резания, понижает прочность и износостойкость инструмента. Так же, одним из проблемных вопросов является необходимость дробления стружки и ее удаления из закрытой или полужакрытой зоны обработки. Различные способы стружколомания вызывают осложнения конструкции инструмента и снижают прочность режущей части [1, 10]. Немаловажную роль в процессе обработки играет и качество получаемой поверхности, которое характеризуется величиной параметра шероховатости  $R_a$  ( $R_z$ ), соответствующей качеству точности обрабатываемой поверхности (табл. 1) [2].