

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2021-23-11-18>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НЕЖЕСТКОГО ДЛИННОМЕРНОГО ВАЛА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ

*Мацейн Н.П., Носов Н.В., Якубович Е.А.*

**Ключевые слова:** токарная обработка, вал, точность формы, деформация, метод конечных элементов, моделирование, ANSYS.

**Аннотация.** В работе предлагается методика управления точностью длинномерного вала при токарной обработке с применением компьютерного моделирования в среде ANSYS. Выполнены расчеты перемещения оси вала из стали 30ХГСА в зависимости от подачи и установлено значение подачи, обеспечивающей заданную величину геометрической точности вала при принятой скорости резания. На основе численных расчетов и данных производственных экспериментов показана возможность обеспечения точности обработки за счет корректировки режимов резания и компенсации деформации вала.

## SIMULATION OF DEFORMATION OF A NON-RIGID LONG SHAFT DURING TURNING ON CNC MACHINES

*Matseyn N.P., Nosov N.V., Yakubovich E.A.*

**Keywords:** turning, shaft, shape accuracy, deflection, finite element method, modeling, ANSYS.

**Abstract.** The paper proposes a method for controlling the accuracy of a long shaft during turning using computer simulation in the ANSYS environment. Calculations of the axis displacement of the shaft made of steel 30HGSА are performed depending on the feed and the value of the feed is established, which provides a given value of the geometric accuracy of the shaft at the adopted cutting speed. On the basis of numerical calculations and data from production experiments, it is shown that it is possible to ensure processing accuracy by adjusting the cutting conditions and compensating for shaft deformation.

Обеспечение эффективности обработки валов на токарных станках с ЧПУ является одной из важных задач повышение производительности и точности обработки этого класса деталей. Основным ограничением при разработке технологического процесса токарной обработки нежестких валов на станках с ЧПУ являются допустимая величина прогиба заготовки, исходя из заданного уровня относительной геометрической точности  $[y]$ . Величина  $[y]$  рассчитывается по формуле:  $[y] \leq T_d$ , где  $T_d$  – допуск на размер,  $k$  – коэффициент, зависящий от уровня относительной геометрической точности и равный 0,3; 0,2; 0,12 соответственно для уровней А, В, С.

Для наиболее важных размеров, особенно если токарная операция является финишной, обычно назначается допуск формы, исходя из конструктивных особенностей и назначения изготавливаемой детали. В этом случае именно допуск формы будет ограничивать величину прогиба заготовки.

При работе на станках с ЧПУ применение традиционных схем закрепления нежестких деталей с использованием люнетов является нежелательным, поскольку увеличивает число переустановок заготовки, а также вспомогательное время, повышает частоту вмешательства рабочего в

цикл обработки. Помимо всего прочего, это может привести к возникновению дополнительных погрешностей, связанных с несовпадением технологических и конструкторских баз, а также отклонениями формы и взаимного расположения базовых поверхностей.

Методы увеличения точности токарной обработки нежестких деталей можно условно разделить на три основных направления (рис. 1).

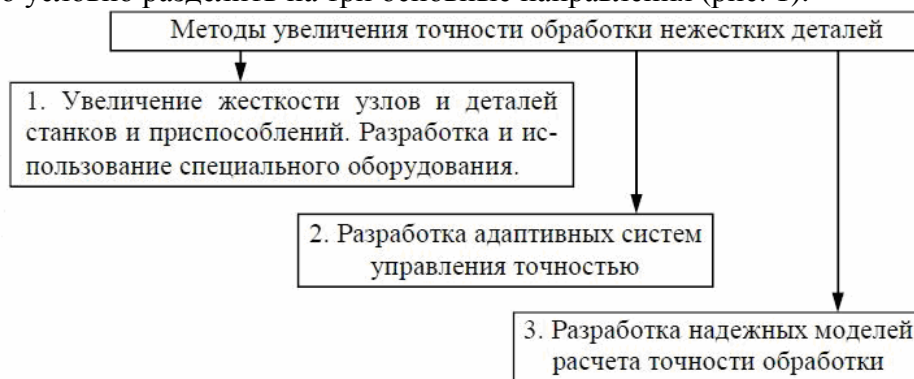


Рис. 1. Классификация методов увеличения точности токарной обработки нежестких деталей

Анализ экспериментальных данных, представленных в [1,2], показал, что в рамках принятой схемы закрепления и геометрических параметров инструментов наибольшее влияние на величину прогиба детали оказывают составляющие силы резания, которые зависят от двух параметров: глубины резания и подачи. Возможность управления точностью формы за счет изменения режимов обработки позволит уменьшить величину прогиба длинномерного вала в соответствии с принятым допуском. Иными словами, актуальной является задача корректировки режимов резания в зависимости от точности формы вала.

В работе предложено величину деформации детали под действием радиальной составляющей силы резания определять на основе математических моделей сопротивления материалов с учетом схемы закрепления.

В работах [3,4] исследованы закономерности влияния сил резания и их направления на величину деформации обрабатываемой детали, а также предложены рекомендации по совершенствованию промышленной технологии обработки. Наиболее перспективным направлением является моделирование процесса обработки длинномерных валов.

В процессе моделирования используются наиболее значимые зависимости, связывающие такие величины как перемещения, деформации и напряжения, характеризующие процесс резания. Основная идея – это применение метода конечных элементов, который состоит в том, что указанные величины можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе подобластей. Соответствующий алгоритм моделирования

реализуется на базе универсального программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS [5,6].

В процессе конечно-элементного моделирования решаются следующие задачи:

- 1) создание 3D модели детали;
- 2) создание конечно-элементной сетки;
- 3) задание свойств материала модели;
- 4) импортирование модели в систему ANSYS;
- 5) задание величины и направления сил резания;
- 6) задание граничных условий для расчета деформации;
- 7) проверка адекватности модели;
- 8) исследование теоретической модели.

В методе конечных элементов выделяют два типа моделей: линейные и нелинейные. Причём линейность и нелинейность может относиться как к геометрии модели, так и к её материалу. Модель считается линейной, если под действием нагрузок она имеет небольшие деформации, а связь между деформациями и напряжениями линейна, т. е. подчиняется закону Гука. Нелинейность предусматривает большие деформации напряжения с более сложным законом их взаимосвязи, что характерно для процесса резания.

Наибольший интерес представляют решения [7-9], которые могут быть использованы для моделирования процесса резания и его остаточных явлений.

Так, для большинства металлов и сплавов суммарную деформацию объекта при механическом и температурном воздействии на него можно представить следующим образом [10,11]:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^y\} + \{\varepsilon^m\} + \{\varepsilon^{nl}\}, \quad (1)$$

где  $\{\varepsilon\}$  – вектор суммарной деформации;  $\{\varepsilon^y\}$  – вектор упругой деформации;  $\{\varepsilon^m\}$  – вектор температурной деформации;  $\{\varepsilon^{nl}\}$  – вектор пластической деформации.

Тогда для определения остаточных деформаций, руководствуясь [9], получим:

$$\{\varepsilon^{ocm}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^y\}, \quad (2)$$

где  $\{\varepsilon^{ocm}\}$  – вектор остаточных деформаций.

Таким образом, для расчёта остаточных деформаций необходимо знать величину пластических и температурных деформаций:

$$\{\varepsilon^{ocm}\} = \{\varepsilon^m\} + \{\varepsilon^{nl}\}, \quad (3)$$

С другой стороны напряжения и деформации связаны соотношением [12]:

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon^h\}, \quad (4)$$

где  $\{\sigma\} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}]^T$  – компоненты тензора напряжений;

$[E]$  – модуль упругости;

$\{\varepsilon^h\}$  – вектор деформаций, которые вызывают возникновение напряжений.

Для остаточных напряжений:

$$\{\sigma^{ост}\} = \{\sigma\} - [D]\{\epsilon^y\}, \quad (5)$$

Для упругих деформаций:

$$\{\epsilon^y\} = \{\sigma\} \cdot [D]^{-1}, \quad (6)$$

где  $[D]$  – матрица упругости.

Соотношения (5) – (6) можно раскрыть и представить в развёрнутом виде, через компоненты векторов. Обычно для напряжений и деформаций принято следующее правило знаков: величины, относящиеся к растяжению, являются положительными, к сжатию – отрицательными.

Компоненты сдвига считаются положительными, если их направления совпадают с направлениями соответствующих координатных осей. Деформации сдвига представляют собой инженерные деформации, а не компоненты тензора.

Результат импортирования модели детали в программу ANSYS представлен на рисунке 2. Исходные параметры для моделирования: длина вала 487мм, диаметр 30мм, модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент установки заготовки  $k_3=102$ , скорость резания 50м/мин, глубина резания 4мм, заданный уровень геометрической точности 0,03мм.

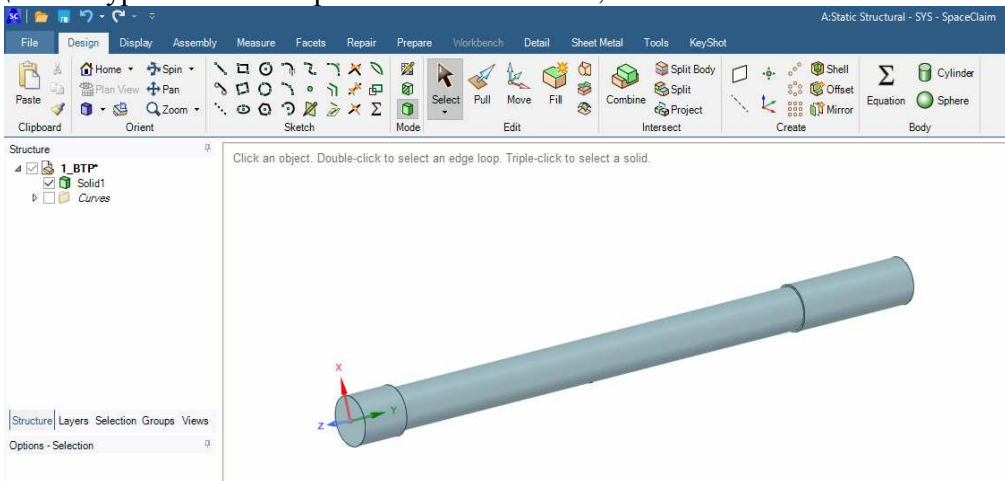


Рис. 2. Импортирование модели в программу ANSYS

Принимая во внимание систему координат в программе ANSYS, задаем силу резания, рассчитанную по методике [6], составляющие которой имеют следующие знаки:  $-F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ . Вектор силы прикладывается в точке касания резца с поверхностью детали (рис. 3).

Модель проверена на адекватность с использованием известных формул сопротивления материала по расчету балки на прочность и жесткость при косом изгибе [13]. Расчеты выполнены для различных положений инструмента и вариантов приложения силы. При этом определялись перемещения поверхности в точках приложения силы (рис. 4). На основе полученных результатов можно сделать вывод, что погрешность расчетов составляет не более 5%.

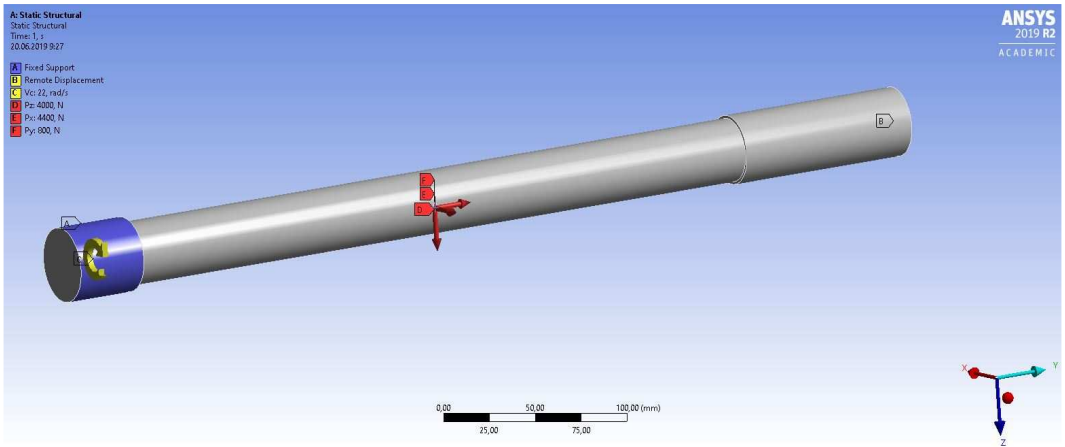


Рис. 3. Задание граничных условий численной модели и приложение вектора силы в точке

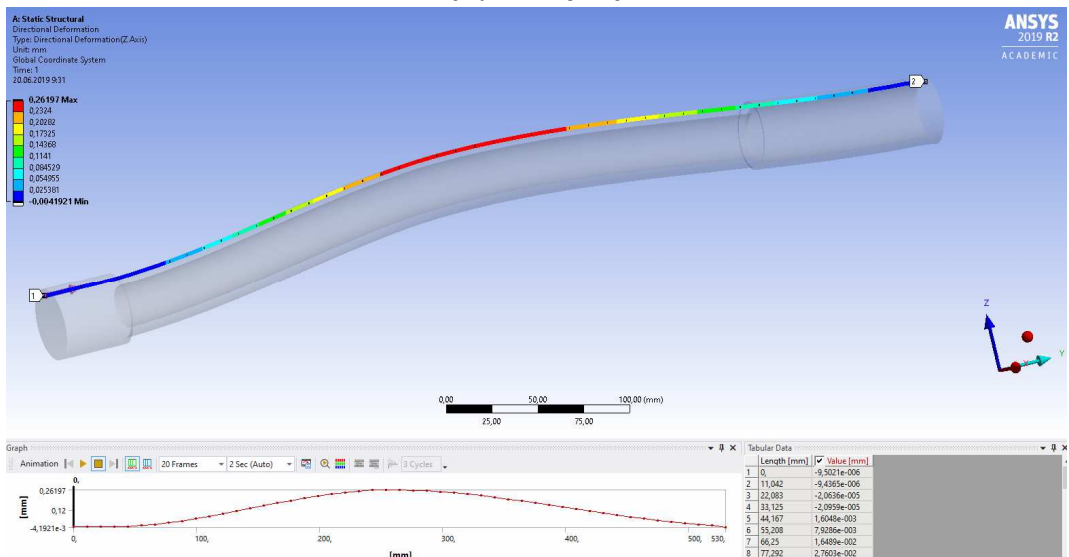


Рис. 4. Перемещение поверхности вала вдоль оси Z

На основе разработанной модели выполнены расчеты перемещения оси вала из стали 30ХГСА в зависимости от подачи при  $[y] = 0,03$  мм. Результаты ожидаемого прогиба представлены в таблице 1.

Табл. 1. Деформации оси детали в зависимости от величины подачи на полустиковой операции при обработке с режимами:  $t = 4$  мм,  $V = 50$  м/мин

Величина подачи S, мм/об	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
Прогиб, $y \cdot 10^3$ , мм	14,447	25,023	32,304	38,223	43,341	47,915	52,089	55,953	59,567	62,973

Как видно из приведенных данных увеличение подачи S сопровождается последовательным ростом величины прогиба  $y$ , при этом выполнение

принятого технологического ограничения на величину прогиба (0,03мм) достигается при значении подачи  $S = 0,5$  мм/об.

Экспериментальная проверка результатов моделирования выполнена в производственных условиях при точении вала из стали 30ХГСА с режимами, которые используются на получистовой операции на токарном станке с ЧПУ MONFORTS RNC 700. Заданное отклонение формы обрабатываемой поверхности не должно превышать 0,03 мм. В процессе обработки использовались: токарный 3х кулачковый самоцентрирующийся патрон SMW-AUTOBLOK KNCS-NB 315-91 и центр грибковый ГОСТ 8742-75. В качестве режущего инструмента использовалась режущая СМП фирмы Sandvik-Coromant CNMG 160608-PR 4325, а в качестве державки для СМП использовалась державка той же фирмы DCLNL 2525M 16. Получистовая обработка осуществлялась с режимами : величина подачи  $S= 0,54$  мм/об, глубина резания  $t = 4$  мм , скорость резания  $V= 50$  м/мин. Длина обработки составляет  $L=385$ мм. Контроль деформации вала показал, что отклонение оси вала составило  $y = 0,028$  мм, что соответствует техническим условиям. Таким образом, принятые режимы резания позволяют обеспечить допустимую деформацию вала в процессе механической обработки на токарных станках с ЧПУ. Данные исследования подтверждаются результатами работ [14-16], в которых предлагается ряд технических решений по управлению точности нежестких валов.

Производственные испытания свидетельствуют об адекватности разработанной методики компьютерного моделирования при оценке возможных геометрических отклонений формы и размеров высокоточных длинномерных валов, которая дает возможность управлять точностью токарной обработки за счет корректировки режимов резания в зависимости от величины деформации вала.

### Список литературы

1. Жданов А.А. Подходы к обеспечению точности токарной обработки нежестких валов на станках с ЧПУ / А.А. Жданов, А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский // Сборник научных трудов SWORLD. – 2014. – Т.8. – С. 96-100.
2. Drachev O.I., Bobrovskii A.V. The Automatic Stabilization Systems of the Non-Rigid Shafts in Turning Work // Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol.158. – P.104-108.
3. Балакшин Б.С. Адаптивное управление станками. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.
4. Патент №2226140 РФ. Устройство для токарной обработки нежестких деталей / Васин С.А. и др. – Оpubл. 27.03.2004, Бюл. № 9.
5. ANSYS 12 LS-DINA User's Guide. Release 12.1. SAS IP, Inc., 2009.
6. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал, УРСС, 2003. – 272 с.

7. Childs T. Metal Machining. Theory and Applications / T.Chids, K.Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane. – ARNOLD, London, 2000. – 416 p.
8. Drachev O., Bobrowskii A., Zotov A. Improving the accuracy of machining of non-rigid shaft // MATEC Web of Conferences. – 2018. – v.224.
9. Maekawa K. and Maeda M. Simulation analysis of three-dimensional continuous chip formation processes – FEM formulation and a few results // Int. Japan Soc. Precis.Eng. – 1993. – Vol. 59 (11). – P. 1827-1833.
10. Nesterenko P.S. and etc. Mathematical model of formation the axial component of the cutting forces at turning structural alloyed steel 3120 / Modern scientific research and their practical application : research bulletin SWorld: vol. J11410 – URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j11410.pdf> (date: May 2014). – P.232-238.
11. Świć A., Wołos D., Zubrzycki J., Opielak M., Gola A., Taranenko V. Accuracy control in the machining of low rigidity shafts // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol.613. – P. 357-367.
12. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
13. Горшков А.Г. Теория упругости и пластичности / А.Г.Горшков, Э.И. Старовойтов, Д.В. Тарлаковский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 416 с.
14. Патент №98964 РФ. Установка для правки валов с одновременной отделочно-упрочняющей обработкой / Гузь В.В., Мураткин Г.В. – Оpubл. 10.11.2010, Бюл. № 23.
15. Патент №2532569 РФ. Устройство для токарной обработки / Драчев О.И., Расторгуев Д.А. – Оpubл. 10.11.2014, Бюл. № 31.
16. Кобзев А.А. Модель процесса токарной обработки в системе автоматического управления / А.А. Кобзев, Л.К. Генералов // СТИН. – 2008. – № 11. – С. 26-29.

### References

1. Zhdanov A.A. Approaches to ensuring the accuracy of turning non-rigid shafts on CNC machines / A.A. Zhdanov, A.L. Plotnikov, Yu.L. Chigirinsky // Collection of scientific papers SWORLD. – 2014. – Vol. 8. – P. 96-100.
2. Drachev O.I., Bobrovskii A.V. The Automatic Stabilization Systems of the Non-Rigid Shafts in Turning Work // Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol.158. – P.104-108.
3. Balakshin B.S. Adaptive machine control / B. S. Balakshin. – М.: Mechanical Engineering, 1973. – 688 p.
4. Patent №2226140 RU. Device for turning non-rigid parts / Vasin S.A. and others. – Publ. March 27, 2004, Bul. No. 9.
5. ANSYS 12 LS-DINA User's Guide. Release 12.1. SAS IP, Inc., 2009.
6. Kaplun A.B. ANSYS in the hands of an engineer: A Practical Guide / A. B. Kaplun, E. M. Morozov, M. A. Olfer'eva. – М.: Editorial, URSS, 2003. – 272 p.
7. Childs T. Metal Machining. Theory and Applications / T.Chids, K.Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane. – ARNOLD, London, 2000. – 416 p.

8. Drachev O., Bobrowskii A., Zotov A. Improving the accuracy of machining of non-rigid shaft // MATEC Web of Conferences. – 2018. – v.224.
9. Maekawa K. and Maeda M. Simulation analysis of three-dimensional continuous chip formation processes – FEM formulation and a few results // Int. Japan Soc. Precis.Eng. – 1993. – Vol. 59 (11). – P. 1827-1833.
10. Nesterenko P.S. and etc. Mathematical model of formation the axial component of the cutting forces at turning structural alloyed steel 3120 / Modern scientific research and their practical application : research bulletin SWorld: vol. J11410 – URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j11410.pdf> (date: May 2014). – P.232-238.
11. Świć A., Wołos D., Zubrzycki J., Opielak M., Gola A., Taranenko V. Accuracy control in the machining of low rigidity shafts // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol.613. – P. 357 – 367
12. Birger I.A. Residual stresses. – M.: Mashgiz, 1963. – 232 p.
13. Gorshkov A.G. Theory of elasticity and plasticity / A. G. Gorshkov, E. I. Starovoitov, D.V. Tarlakovsky. – M.: FIZMATLIT, 2002. – 416 p.
14. Patent №98964 RU. Installation for shafts straightening with simultaneous finishing and hardening processing / Guz V.V., Muratkin G.V. – Publ. 10.11.2010, Bul. No. 23.
15. Patent №2532569 RU. A device for turning / Drachev O.I., Rastorguev D.A. – Publ. 10.11.2014, Bul. No. 31.
16. Kobzev A.A. Model of the turning process in the automatic control system / A.A. Kobzev, L.K. Generalov // STIN. – 2008. – No.11. – P. 26-29.

<b>Мацейн Никита Павлович</b> – аспирант, matsey95@gmail.com	<b>Matseyn Nikita Pavlovich</b> – graduate student, matsey95@gmail.com
<b>Носов Николай Васильевич</b> – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», nosov.nv@samgtu.ru	<b>Nosov Nikolay Vasilevich</b> – doctor of technical science, professor, Department «Mechanical engineering technology, machine tools and tools», nosov.nv@samgtu.ru
<b>Якубович Ефим Абрамович</b> – кандидат технических наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», eyakubovich@mail.ru	<b>Yakubovich Efim Abramovich</b> – candidate of technical science, professor, Department «Metal science, powder metallurgy, nanomaterials», eyakubovich@mail.ru
Самарский государственный технический университет, г.Самара, Россия	Samara state technical university, Samara, Russia

*Received 27.01.2021*